

การสังเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพจากเมทิลเอสเทอร์ของน้ำมันปรุงอาหารใช้
แล้วโดยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันร่วมกับเอทิลีนไกลคอล
Synthesis of Bio-lubricant from waste cooking oil methyl ester by
Transesterification reaction via Ethylene glycol



ปัญหาพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมแปรรูปอาหาร

คณะอุตสาหกรรมอาหาร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ใบรับรองปัญหาพิเศษ

การสังเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพจากเมทิลเอสเทอร์ของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วโดย

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันร่วมกับเอทิลีนไกลคอล

Synthesis of Bio-lubricant from waste cooking oil methyl ester by

Transesterification reaction via Ethylene glycol

จัดทำโดย

ธนากร วังซัง รหัสนักศึกษา 62080189

วรวิทย์ ทองประดิษฐ์ รหัสนักศึกษา 62080218

อนุพันธ์ ทรัพย์มี รหัสนักศึกษา 62080234

ได้รับการพิจารณาเห็นชอบจาก

.....


..... 26 / พ.ค. / 66

(ผศ.ดร. พงษ์เสริฐ ศรีพรหม)

อาจารย์ที่ปรึกษาปัญหาพิเศษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปัญหาพิเศษ การสังเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพจากเมทิลเอสเทอร์ของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วโดยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันร่วมกับเอทิลีนไกลคอล

ชื่อนักศึกษา ชนากร วังซัง รหัสนักศึกษา 62080189
วรวัฏฒิ ทองประดิษฐ์ รหัสนักศึกษา 62080218
อนุพันธ์ ทรัพย์มี รหัสนักศึกษา 62080234

หลักสูตร วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมแปรรูปอาหาร
พ.ศ. 2566
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. พงษ์เสริฐ ศรีพรหม

บทคัดย่อ

เนื่องจากในอุตสาหกรรมอาหารและครัวเรือน มีปริมาณน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเหลือทิ้งเป็นจำนวนมากและยังไม่มีการจัดการที่ถูกต้อง โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการหาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพจากเมทิลเอสเทอร์ของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วโดยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันร่วมกับเอทิลีนไกลคอล และศึกษาผลของตัวแปรและคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ ซึ่งทำการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken โดยกำหนดตัวแปร 3 ตัวแปร ได้แก่ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (110-130°C) เวลาในการทำปฏิกิริยา (120-240 นาที) และอัตราส่วนโมลาร์ FAMES:EG (1:1-3:1) การทดลองทั้งหมด 30 การทดลอง ผลการศึกษาพบว่า สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการสังเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพจากเมทิลเอสเทอร์ของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วร่วมกับเอทิลีนไกลคอล พบว่า อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 110°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 135 นาที และ อัตราส่วนโมลาร์ FAMES:EG เท่ากับ 2:1 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา K_2CO_3 เข้มข้น 1%w/w สามารถผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพได้ร้อยละ 80 จากนั้นทำการยืนยันผลที่สภาวะที่เหมาะสม ด้วยการทดลอง 3 ครั้ง โดยได้ผลผลิตร้อยละ 85,75 และ 80 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าที่สภาวะที่เหมาะสมสามารถใช้ในการทำนายได้อย่างน่าเชื่อถือ จากนั้นทำการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพที่ได้จากสภาวะด้วยเครื่อง FT-IR spectroscopy และทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ พบว่า ความหนืดที่ 40°C และ 100°C มีค่าเท่ากับ 12.22 และ 3.32 Cst ตามลำดับ ดัชนีความหนืด (Viscosity Index) มีค่าเท่ากับ 151.11 ค่าความเป็นกรด มีค่าเท่ากับ 1.65 mg KOH/g จุดวาบไฟ มีค่าเท่ากับ 125°C และการต้านทานการเกิดออกซิเดชัน มีค่าเท่ากับ 9 นาที ซึ่งจะเห็นได้ว่าการสังเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพจากเมทิลเอสเทอร์ของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วร่วมกับเอทิลีนไกลคอล เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพแล้วส่วนใหญ่มีค่าที่ใกล้เคียงกับมาตรฐาน ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงคุณภาพต่อไปในอนาคต

คำสำคัญ: น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ, ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน, ไบโอดีเซล, น้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว, เอทิลีนไกลคอล

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special problem title Synthesis of Bio-lubricant from waste cooking oil methyl ester
by Transesterification reaction via Ethylene glycol

Student name Thanakorn Whangchang Student ID 62080189
 Worawut Thongpradit Student ID 62080218
 Anuphan Submee Student ID 62080234

Program Bachelor of Science in Food Process Engineering

Year 2023

Advisor Assist.Prof.Dr. Pongsert Sriprom

ABSTRACT

The food industry has a large amount of waste cooking oil, which must be appropriately managed. This research aimed to determine the optimum conditions for bio-lubricant synthesis from methyl esters of waste cooking oil by transesterification via ethylene glycol and to study the effects of variables and physicochemical properties of bio-lubricants. The Box-Behnken experiment was designed by defining three variables: reaction temperature (110-130°C), reaction time (120-240 min), and FAMES: EG molar ratio (1:1). -3:1) Total 30 trials, the study found that The optimum condition for bio-lubricant synthesis from methyl esters of used cooking oil by transesterification with ethylene glycol was found that the reaction temperature 110°C, reaction time 135 min and FAMES: EG molar ratio of 2:1, using 1%w/w K_2CO_3 catalyst, 80% of bio-lubricant can be produced. Then, the results were confirmed at optimum conditions with three experiments with yields of 85, 75, and 80%, respectively, showing that at optimum conditions, it can be used to make reliable predictions. The chemical structure of the bio-derived lubricant was then analyzed by FT-IR spectroscopy and the physical properties of the bio-lubricant were investigated. The viscosity at 40°C and 100°C was found to be 12.22 and 3.32 Cst, respectively. The viscosity index was 151.11, the acidity was 1.65 mg KOH/g, and the flash point was 1.65 mg KOH/g. 125°C and oxidation resistance is 9 min. It can be seen that the synthesis of bio-lubricants from methyl esters of waste cooking oil in combination with ethylene glycol. Compared to the standards of bio-lubricants, most of them are close to the standards. Therefore, quality needs to be further improved in the future.

Keywords: Biolubricant, Transesterification, Biodiesel, Waste cooking oil, Ethylene glycol

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปัญหาพิเศษนี้จะไม่สำเร็จล่วงได้ ถ้าไม่ได้ ผศ.ดร. พงษ์เสรีรัฐ ศรีพรหม ,ผศ.ดร. พรรสวรรณค์ อัสว
 แสงรัตน์ ที่ได้ให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหา สนับสนุนข้อมูลในด้านต่างๆ ในการทำปัญหาพิเศษ
 นี้ รวมถึงความรู้ข้อคิดต่างๆ ที่นอกเหนือจากการทำปัญหาพิเศษได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ขอขอบคุณ นายวสันต์
 โชคลาภ ,นางสาวลำพิ่ง พุ่มจันทร์ ,นายอภิพงษ์ ไพค่านาม ที่ได้ให้คำแนะนำเกี่ยวกับอุปกรณ์ เครื่องมือในการ
 วิเคราะห์ผล และให้คำปรึกษาในด้านต่างๆเกี่ยวกับปัญหาพิเศษนี้

นอกจากนี้คณะผู้จัดทำขอขอบคุณครอบครัว ที่สนับสนุนในทุกๆเรื่อง และอีกหลายท่านที่ไม่ได้เอ่ยนามไว้
 ณ ที่นี้ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือมาโดยตลอดการจัดทำปัญหาพิเศษนี้ หากหนังสือปัญหาพิเศษเล่มนี้มีข้อผิดพลาด
 ประการใดเกิดขึ้น คณะผู้จัดทำขออภัยไว้ด้วย

ธนากร วังซัง

วรวิฒิ ทองประดิษฐ์

อนุพันธ์ ทรัพย์มี

11 พฤษภาคม 2566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | I |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | II |
| กิตติกรรมประกาศ..... | III |
| สารบัญ..... | IV |
| สารบัญตาราง..... | VI |
| สารบัญภาพ..... | VII |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา..... | 2 |
| 1.3 ขอบเขตการศึกษา..... | 2 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 3 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 4 |
| 2.1 ไขมันและน้ำมัน (Fat and oil)..... | 4 |
| 2.2 น้ำมันปรุงอาหารที่ผ่านการใช้แล้ว (Waste cooking oil)..... | 6 |
| 2.3 ไบโอดีเซล (Biodiesel)..... | 7 |
| 2.4 น้ำมันหล่อลื่น (Lubricating Oil)..... | 9 |
| 2.5 น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ (Biolubricant)..... | 11 |
| 2.6 คุณสมบัติในการเป็นน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ..... | 12 |
| 2.7 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน(Transesterification)..... | 14 |
| 2.8 เอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol)..... | 17 |
| 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 17 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง..... | 19 |
| 3.1 วัดอุณหภูมิตบและสารเคมี..... | 19 |
| 3.2 อุปกรณ์..... | 19 |
| 3.3 ขั้นตอนและวิธีการทดลอง..... | 21 |
| 3.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติของสารหล่อลื่นชีวภาพ..... | 25 |
| 3.5 การออกแบบการทดลอง..... | 27 |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์..... | 29 |
| 4.1 ผลการศึกษาการสังเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพจากไบโอดีเซล..... | 29 |
| 4.2 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพจาก WCO ด้วยการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน..... | 30 |
| 4.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติเคมีกายภาพของน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ..... | 41 |
| บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ..... | 46 |
| 5.1 สรุปผล..... | 46 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ..... | 47 |
| บรรณานุกรม..... | 48 |
| ภาคผนวก..... | 51 |
| ภาคผนวก ก..... | 52 |
| ภาคผนวก ข..... | 59 |
| ประวัติผู้เขียน..... | 63 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า | |
|----------|--|----|
| 2.1 | คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานปิโตรเลียม | 14 |
| 3.1 | แสดงคุณสมบัติ เครื่องมือวิเคราะห์ และวิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์หาคุณสมบัติของ น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ..... | 25 |
| 3.2 | ปัจจัยและระดับการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken design..... | 27 |
| 3.3 | การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken แสดงจำนวนครั้งของการทดลองหาสภาวะ ที่เหมาะสมในการสังเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพจากน้ำมันไบโอดีเซลโดยปฏิกิริยา รานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ทั้งหมด 30 วัน..... | 27 |
| 4.1 | แสดงร้อยละผลผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพตามการออกแบบการทดลอง box-Behnken design..... | 30 |
| 4.2 | การวิเคราะห์การถดถอยของพื้นผิวตอบสนอง..... | 32 |
| 4.3 | ร้อยละผลผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพตามสภาวะจากสภาวะที่เหมาะสมที่สุด..... | 41 |
| 4.4 | ตารางแสดงสมบัติทางเคมีและกายภาพของน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพเปรียบเทียบกับ มาตรฐานน้ำมันหล่อลื่น..... | 44 |
| ก.1 | การทดลองสังเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ และการตรวจวัดความหนืด..... | 53 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ

| ภาพที่ | หน้า |
|--|------|
| 2.1 โครงสร้างของไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride)..... | 5 |
| 2.2 กรดไขมันอิสระ (Free fatty acids)..... | 6 |
| 2.3 ปฏิกิริยาการเกิดไฮโดรไลซิส | 7 |
| 2.4 โครงสร้าง ไบโอดีเซล (Fatty acids methyl ester)..... | 8 |
| 2.5 โครงสร้างน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพจาก Ethylene glycol..... | 11 |
| 2.6 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันของ triglycerides เป็นน้ำมันไบโอดีเซล..... | 14 |
| 2.7 การสังเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพจากเอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol)..... | 17 |
| 3.1 แสดงการแยกชั้นระหว่างเมทิลเอสเทอร์ (Biodiesel) และกลีเซอรอล..... | 21 |
| 3.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วโดยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน..... | 22 |
| 3.3 ขวดกักกลที่ต่อกับชุดรีฟลักซ์คอนเดนเซอร์..... | 23 |
| 3.4 ขั้นตอนการสังเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ (Bio-lubricant) จากน้ำมันไบโอดีเซล..... | 24 |
| 4.1 FTIR spectrum จากการทดลองสังเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ..... | 29 |
| 4.2 พล็อตค่าความคลาดเคลื่อน (Residual plot) ของร้อยละผลผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ..... | 33 |
| 4.3 พล็อตแสดงผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ..... | 34 |
| 4.4 พล็อตแสดงผลของเวลาต่อร้อยละผลผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ..... | 35 |
| 4.5 พล็อตแสดงผลของอัตราส่วน FAMES : EG ต่อร้อยละผลผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ..... | 36 |
| 4.6 Contour Plot อิทธิพลร่วมของอุณหภูมิและเวลาต่อร้อยละผลผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ..... | 37 |
| 4.7 Contour Plot อิทธิพลร่วมของอุณหภูมิและอัตราส่วน FAME:EG ต่อร้อยละผลผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ..... | 38 |
| 4.8 Contour Plot อิทธิพลร่วมของเวลาและอัตราส่วน FAME : EG ต่อร้อยละผลผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ..... | 39 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ(ต่อ)

| ภาพที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.9 การวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพจากน้ำมันไบโอดีเซลด้วย ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน..... | 40 |
| 4.10 FTIR spectrum ของไบโอดีเซล..... | 42 |
| 4.11 FTIR spectrum ของน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ..... | 43 |
| ก.1 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน FTIRการสังเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพครั้งที่ 1 ที่ อุณหภูมิ 120°C,เวลา 180 นาที และอัตราส่วน FAME:EG 1:1..... | 54 |
| ก.2 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน FTIRการสังเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพครั้งที่ 2 ที่ อุณหภูมิ 120°C,เวลา 180 นาที และอัตราส่วน FAME:EG 1:1..... | 54 |
| ก.3 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน FTIRการสังเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพครั้งที่ 3 ที่ อุณหภูมิ 120°C,เวลา 180 นาที และอัตราส่วน FAME:EG 1:1..... | 55 |
| ก.4 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน FTIRการสังเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพครั้งที่ 4 ที่ อุณหภูมิ 120°C,เวลา 180 นาที และอัตราส่วน FAME:EG 1:1.5..... | 55 |
| ก.5 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน FTIRการสังเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพครั้งที่ 5 ที่ อุณหภูมิ 120°C,เวลา 180 นาที และอัตราส่วน FAME:EG 2:1..... | 56 |
| ก.6 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน FTIRการสังเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพครั้งที่ 6 ที่ อุณหภูมิ 120°C,เวลา 180 นาที และอัตราส่วน FAME:EG 2:1..... | 56 |
| ก.7 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน FTIRการสังเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพครั้งที่ 7 ที่ อุณหภูมิ 120°C,เวลา 180 นาที และอัตราส่วน FAME:EG 3:1..... | 57 |
| ก.8 ผลการวิเคราะห์ GC-SIM แสดงจำนวนคาร์บอนของ Biodiesel..... | 57 |
| ก.9 ผลการวิเคราะห์ GC-SIM แสดงจำนวนคาร์บอนของ Biolubricant..... | 58 |
| ข.1 ตัวอย่างน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว (Waste cooking oil)..... | 59 |
| ข.2 ตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซล (Biodiesel)..... | 59 |
| ข.3 เอทิลีนไกลคอลและโพแทสเซียมคาร์บอเนต..... | 60 |
| ข.4 การทำบริสุทธิ์น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ..... | 60 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

| ภาพที่ | | หน้า |
|--------|---|------|
| ข.5 | เมทานอลที่เป็น by product ของการผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ..... | 61 |
| ข.6 | การกรองน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ..... | 61 |
| ข.7 | การวัดปริมาณน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพและผลิตภัณฑ์น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ..... | 62 |
| ข.8 | การทำงานของชุดรีฟลักซ์คอนเดนเซอร์..... | 62 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมีปริมาณน้ำมันปรุงอาหารที่ใช้แล้ว (Waste cooking oil) เหลือทิ้งจากครัวและอุตสาหกรรมการผลิตประมาณ 16.5 ล้านตันต่อปี Mohamad R. Khodadadi และคณะ(2020) และในประเทศไทยคาดว่าจะมีถึง 74 ล้านลิตรต่อปี จาก ธงชัย พรรณสวัสดิ์ (2007) ซึ่งการกำจัดน้ำมันอย่างผิดวิธีทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จึงต้องแก้ไขปัญหานี้ โดยน้ำมันปรุงอาหารที่ใช้แล้ว สามารถนำมาเพิ่มมูลค่าดีกว่านำไปทิ้ง โดยการปรับปรุงคุณสมบัติเพื่อผลิตเป็นไบโอดีเซล และนอกจากนั้นยังสามารถนำมาผลิตเป็นน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ ซึ่งสามารถใช้ได้ในโรงงานอุตสาหกรรม โดยปกติจะเป็นน้ำมันหล่อลื่นที่ได้จากการสังเคราะห์ ซึ่งมีราคาค่อนข้างสูงและส่งผลกระทบต่อการผลิตอาหาร ถ้าหากสามารถทำเป็นน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพได้ จะสามารถใช้แทนน้ำมันหล่อลื่นปิโตรเลียมที่ไม่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติและตกค้างในสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังลดต้นทุนการผลิต เป็นทางเลือกใหม่ ซึ่งเป็นฟู้ดเกรด (Food grade) เหมาะสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมอาหาร ซึ่งน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพสามารถสังเคราะห์ได้จากหลายปฏิกิริยา เช่น ปฏิกิริยา epoxidation, ปฏิกิริยา oligomerization และปฏิกิริยา transesterification โดยปฏิกิริยาที่ง่ายและมีการใช้บ่อยที่สุดคือปฏิกิริยา transesterification ซึ่งจะหยิบยกมาใช้ในงานวิจัยนี้

การสังเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ มีการศึกษามากมายจากนักวิจัย โดยส่วนใหญ่จะใช้ปฏิกิริยา transesterification โดย N.A. Zainal และคณะ (2018) ได้ศึกษาคุณสมบัติในการสังเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพจากน้ำมันเมล็ดในปาล์มโดยใช้ trimethylolpropane เป็นแอลกอฮอล์ ได้ผลผลิต 98% มีจุดไหลเท -5.6°C มีความหนืด การทนทานต่อความร้อนและเสถียรภาพทางออกซิเดชันที่ดี และจากงานของ Beatriz Angulo และคณะ (2018) ได้ศึกษาคุณสมบัติในการสังเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพจากไขมันปลาโดยใช้ trimethylolpropane เป็นแอลกอฮอล์ ได้ผลผลิต 78% พบว่ามีความเหมาะสมกับคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพโดยค่าความหนืดที่ 100°C อยู่ที่ 5.81, ค่าดัชนีความหนืดอยู่ที่ 211, จุดไหลเทอยู่ที่ -6°C และจุดวาบไฟอยู่ที่ 204°C โดยปัญหาที่พบคือการเกิดคราบหรือ varnish จึงมีคนที่ทำการศึกษาการใช้แอลกอฮอล์ Ethylene glycol ซึ่งเป็น cleaner สามารถป้องกันการแข็งตัวหรือการเกิด varnish ได้ โดย N.K.Attia และคณะ (2020) มีการศึกษาคุณสมบัติในการสังเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพจากน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วโดยใช้ Ethylene glycol เป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แอลกอฮอล์ พบว่ามีความเสถียรทางความร้อนที่ดี, จุดไหลเทอยู่ที่ -12°C , และความหนืด 147 จะเห็นว่าการใช้ Ethylene glycol เป็นแอลกอฮอล์สามารถให้คุณสมบัติที่ดีในการเป็นน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพได้ แต่ข้อมูลที่มียังไม่เพียงพอ

ดังนั้น ปัญหาพิเศษนี้จึงศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์สารหล่อลื่นชีวภาพจากเมทิลเอสเทอร์ของน้ำมันปรุงอาหารที่ใช้แล้วโดยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันร่วมกับเอทิลีนไกลคอล โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ ประกอบด้วย อุณหภูมิ เวลา และอัตราส่วนโมลาร์ของสารตั้งต้น แล้วนำมาตรวจวิเคราะห์เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์สารหล่อลื่นชีวภาพจากกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ด้วย Ethylene glycol
- 1.2.2 เพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่อการสังเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ
- 1.2.3 ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 ปัจจัยในการสังเคราะห์สารหล่อลื่นชีวภาพจากกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์

- 1.3.1.1 อัตราส่วน FAME ต่อ EG (1:1 – 3:1)
- 1.3.1.2 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ($110-130^{\circ}\text{C}$)
- 1.3.1.3 เวลาในการทำปฏิกิริยา (120-240 นาที)

1.3.2 คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ

- 1.3.2.1 ความหนืด
- 1.3.2.2 ดัชนีความหนืด
- 1.3.2.3 จุดวาบไฟ
- 1.3.2.4 ค่าความเป็นกรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.2.5 ค่า Oxidative Stability

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบสถานะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์สารหล่อลื่นชีวภาพโดยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน จากกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์

1.4.2 ทราบคุณสมบัติทางด้านเคมี และกายภาพต่างๆของสารหล่อลื่นชีวภาพ

1.4.3 ได้ประโยชน์จากการนำน้ำมันปรุงอาหารที่ใช้แล้ว กลับมาใช้เพื่อเพิ่มคุณค่า เป็นพลังงานหมุนเวียน ช่วยลดผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการเหลือทิ้ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

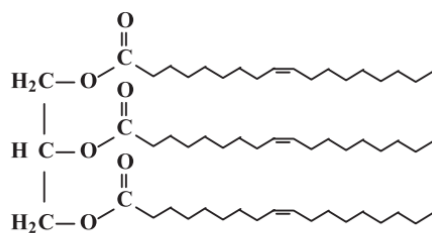
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไขมันและน้ำมัน (Fat and oil)

ไขมันและน้ำมันเป็นเอสเทอร์ชนิดหนึ่งซึ่งมีอยู่ในธรรมชาติ จัดว่าเป็นสารอินทรีย์ประเภทเดียวกับไข (Wax) รวมเรียกว่า ลิพิด(Lipid) เป็นเอสเทอร์ที่โมเลกุลมีขนาดใหญ่ไม่มีขั้วจึงไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้ในตัวทำละลายไม่มีขั้ว คือตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น คลอโรฟอร์ม อีเทอร์ โพรพานอน เบนซีน เป็นต้น ลิพิดซึ่งแบ่งเป็นไขมันและน้ำมันนั้นอาศัยสถานะเป็นเกณฑ์ ไขมันจะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง ในขณะที่น้ำมันจะเป็นของเหลว ทั้งไขมันและน้ำมันมีโครงสร้างอย่างเดียวกัน คือ เป็นเอสเทอร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างกลีเซอรอล กับกรดไขมัน กลีเซอรอล (glycerol) เป็นสารประเภทแอลกอฮอล์ กรดไขมัน (fatty acid) เป็นสารประเภทกรดอินทรีย์ เอสเทอร์ที่เป็นไขมัน และน้ำมัน เรียกกันทั่ว ๆ ไปว่ากลีเซอไรด์ (glyceride) หรือ กลีเซอริล เอสเทอร์ (glyceryl ester) ประเภทของไขมันได้แก่ ไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride), คอเลสเตอรอล(Cholesterol), กรดไขมันอิสระ (Free fatty acid) และฟอสโฟลิพิด(Phospholipid)

2.1.1 ไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) โมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ เกิดจากการรวมตัวของกรดไขมัน (fatty acid) 3 โมเลกุล กับกลีเซอรอล 1 โมเลกุลด้วยพันธะเอสเทอร์ ไตรกลีเซอไรด์คือไขมันที่ได้รับจากอาหารที่ทานเข้าไป หรือร่างกายสร้างขึ้นเองได้ด้วยตับและลำไส้เล็ก ให้พลังงานอยู่ที่ 9 แคลอรีต่อ (ampro, 2017) ไตรกลีเซอไรด์สามารถเกิดได้หลายปฏิกิริยา เช่น ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ซึ่งไตรกลีเซอไรด์จะถูกน้ำสลายพันธะเอสเทอร์ทำให้เกิดเป็นกรดไขมันอิสระ (Free fatty acid) ทำให้มีค่าความเป็นกรดสูงขึ้น และยังเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน กับไตรกลีเซอไรด์ที่มีกรดไขมันไม่อิ่มตัว (Unsaturated fatty acid) จะทำให้เกิดกลิ่นเหม็นหืน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Triglycerides

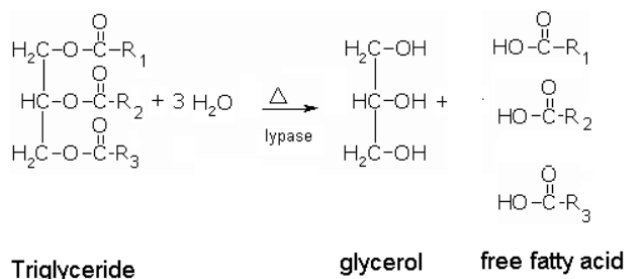
ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride)

ที่มา : N.K. Attia และคณะ(2020)

2.1.2 กรดไขมันอิสระ (Free fatty acids) คือกรดไขมัน (fatty acid) ที่ไม่ได้รวมอยู่เป็นองค์ประกอบในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์(triglyceride)โดยปกติ กรดไขมันซึ่งจัดเป็นลิพิด (lipid) มักพบอยู่ในน้ำมันและไขมันที่ใช้ปรุงอาหารบริโภค โดยจะรวมกันในรูปของไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) หากถูกแยกออกมาโดยการไฮโดรไลซ์ จะอยู่ในรูปของกรดไขมันอิสระ

การเกิดกรดไขมันอิสระในอาหาร เป็นดัชนีบ่งชี้คุณภาพของน้ำมันพืช (vegetable oil) ไขมันและน้ำมันทอดซ้ำ รวมทั้งอาหารที่มีไขมันสูง ปริมาณกรดไขมันอิสระ เป็นต้นเหตุสำคัญของการเสื่อมเสียอาหาร (food spoilage) คือการเกิดกลิ่นผิดปกติ (off flavour) ที่เรียกว่า กลิ่นหืน (rancidity) และทำให้ค่าความเป็นกรด (acid value, AV) ของน้ำมันสูงขึ้น กรดไขมันอิสระ ที่เป็นกรดไขมันที่มีสายสั้น (short chain fatty acid) เช่น butyric acid ตัวมันเองมีกลิ่นเหม็นหุดออกมาเป็นโมเลกุลอิสระ ทำให้เกิดกลิ่นผิดปกติในอาหาร นอกจากนี้ กรดไขมันอิสระ ประเภทกรดไขมันไม่อิ่มตัว (unsaturated fatty acid) เป็นสาเหตุเบื้องต้นของ การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของลิพิด (lipid oxidation) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ที่ทำให้การเหม็นหืนเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.2 กรดไขมันอิสระ (Free fatty acids)

ที่มา : ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ ดร.นิธิยา รัตนาปนนท์ (2020)

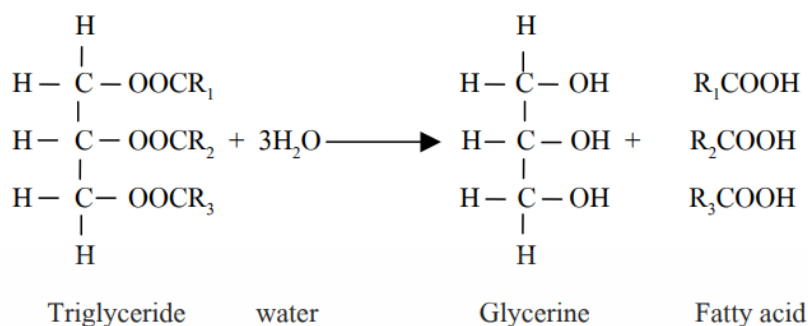
2.2 น้ำมันปรุงอาหารที่ผ่านการใช้แล้ว (Waste cooking oil)

น้ำมันใช้แล้ว หรือ Waste Cooking Oil เป็นน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนจากกระบวนการทำอาหาร โดยเฉพาะอย่างยิ่งอาหารจานทอดทั้งหลาย (Deep fry) แหล่งที่มาของน้ำมันใช้แล้ว นอกจากน้ำมันที่ใช้ทอดแล้ว ยังสามารถมาจากน้ำมันจากการล้างภาชนะ ซึ่งสามารถแยกออกจากน้ำได้โดยบ่หรือถังตกไขมัน สำหรับประเทศไทยแล้วน้ำมันใช้แล้วส่วนใหญ่จะเป็นน้ำมันปาล์ม (90%) เนื่องจากคุณสมบัติที่เหมาะสมในการทอดอาหาร และราคาถูก โดยประเทศไทยมีผลผลิตน้ำมันเป็นอันดับ 3 ของโลกมีผลผลิตส่งออก 15.4 ล้านตันต่อปีโดยคิดเป็น 3.9% ของผลผลิตน้ำมันทั่วโลก จากข้อมูลสถิติการบริโภคและใช้น้ำมันพืชของประเทศไทย พบว่าคนไทยบริโภคน้ำมันพืช 800,000 ตันต่อปี จาก สำนักข่าว สสส (2555) คุณสมบัติของน้ำมันใช้แล้วของประเทศไทย จะมีคุณลักษณะคล้ายกับน้ำมันปาล์ม ซึ่งประกอบไปด้วยไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) แต่มีคุณภาพต่ำเนื่องจากผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่สูงและปนเปื้อนน้ำและเศษอาหาร โดยเฉพาะ ค่าความเป็นกรดที่สูง (Acid value) จากการสลายตัวของไตรกลีเซอไรด์เป็นกรดไขมันอิสระ (Free fatty acid) จากกระบวนการสลายตัวด้วยน้ำ (Hydrolysis)

ปฏิกิริยาของน้ำมันที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการทอด

2.2.1 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ของไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) น้ำที่อยู่ในอาหารและความชื้นในบรรยากาศทำปฏิกิริยากับน้ำมันทอดที่อุณหภูมิสูงเกิดเป็นกรดไขมันอิสระ (Free fatty acid) และกลีเซอรอลจะเพิ่มความเข้มข้นของโมเลกุลที่มีขั้วทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.3 ปฏิกิริยาการเกิดไฮโดรไลซิส

ที่มา : องอาจ แสงรุ่ง (2530)

2.2.2 ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Lipid oxidation) ระหว่างออกซิเจนกับไตรกลีเซอไรด์ ที่มีกรดไขมันไม่อิ่มตัว ทำให้เกิดกลิ่นรสที่ผิดปกติ (Rancidity)

2.2.3 ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) ภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจน ทำให้เกิดสารประกอบที่มีวงแหวนเรียกว่า Cyclic compounds ซึ่งจะส่งผลเสียต่อร่างกายหากรับประทานเข้าไปในปริมาณมาก และเกิดเป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ทำให้ไขมันมีความหนืดเพิ่มขึ้น

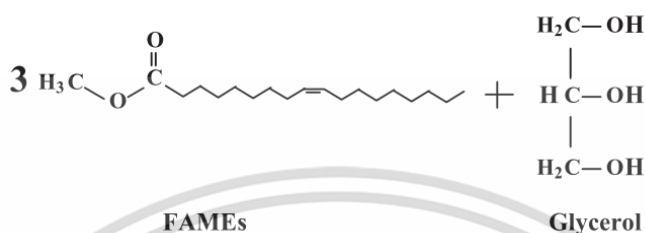
2.2.4 ปฏิกิริยาเทอร์มอลดีเกรเดชัน (Thermal degradation) คือการย่อยสลายไตรกลีเซอไรด์แบบไม่ใช้ออกซิเจนที่อุณหภูมิสูง ทำให้เกิดกลิ่นที่ผิดปกติ และเกิดควันระหว่างการทอด

2.3 ไบโอดีเซล (Biodiesel)

ไบโอดีเซลเป็นพลังงานทดแทนเชื้อเพลิงดีเซล จัดเป็นสารประเภทเอสเทอร์ทำจากน้ำมันพืชผ่านกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่ากระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน (Transesterification Process) โดยให้น้ำมันพืชทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ เช่นเมทานอล หรือเอทานอล และมีด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา มีลักษณะเป็นเอสเทอร์ของกรดไขมัน เรียกว่า Fatty Acid Methyl Ester การเรียกชื่อประเภทของไบโอดีเซลขึ้นกับชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เช่น เมทิลเอสเทอร์ เป็นเอสเทอร์ที่ได้จากการใช้เมทานอลเป็นสารในการทำปฏิกิริยา หรือเอทิลเอสเทอร์ เป็นเอสเทอร์ที่ได้จากการใช้เอทานอล เป็นสารในการทำปฏิกิริยา

ไบโอดีเซลส่วนใหญ่จะผลิตมาจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนเช่น น้ำมันที่ผ่านการทำอาหาร, น้ำมันถั่วเหลือง, และไขมันจากสัตว์เพื่อนำมาใช้ใหม่โดยสามารถนำมาใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลได้ เป็นน้ำมันทางเลือกนอกเหนือจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำมันดีเซลที่ผลิตจากปิโตรเลียม โดยมีคุณสมบัติเผาไหม้ที่คล้ายกับน้ำมันดีเซลมากและสามารถแทนกันได้ โดยคุณสมบัติสำคัญของไบโอดีเซลคือ ย่อยสลายเองได้ตามธรรมชาติและไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม



ภาพที่ 2.4 โครงสร้าง ไบโอดีเซล (Fatty acids methyl ester)

ที่มา : N.K. Attia และคณะ (2020)

ไบโอดีเซลแบ่งตามวัตถุดิบที่ใช้ได้เป็น 3 ชนิดคือ

2.3.1 น้ำมันพืชและไขมันสัตว์

เป็นไบโอดีเซลที่ได้จากน้ำมันพืชและไขมันสัตว์โดยตรง ไม่ต้องเติมสารเพื่อให้เกิดปฏิกิริยา ซึ่งเหมาะกับเครื่องยนต์ที่มีรอบต่ำ เพราะน้ำมันมีความหนืดสูง เกิดเกิดเป็นไขได้หากอุณหภูมิต่ำลง จะทำให้เกิดเป็นคราบเขม่า เป็นผลเสียต่อเครื่องยนต์

2.3.2 ไบโอดีเซลแบบผสม

เป็นไบโอดีเซลที่ได้จากน้ำมันพืชและไขมันสัตว์ผสมกับน้ำมันปิโตรเลียม เพื่อเป็นการลดความหนืดของน้ำมันพืช พบว่าส่งผลกระทบต่อเครื่องยนต์จึงนิยมใช้ในเครื่องที่มีรอบต่ำ และเครื่องยนต์ทางการเกษตรเท่านั้น เช่น ไบโอดีเซลผสม B5 คือ ไบโอดีเซล 5% ผสมกับ ดีเซล 95%

2.3.3 ไบโอดีเซลเอสเทอร์

เป็นไบโอดีเซลที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ กับแอลกอฮอล์โดยใช้กรดหรือเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นเอสเทอร์ที่มีคุณสมบัติคล้ายน้ำมันดีเซล สามารถใช้กับเครื่องยนต์ได้จริง และพบว่ามีกำมะถันคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide, CO) และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur dioxide, SO₂) สูสิ่งแวดลอมในปริมาณที่น้อยกว่าน้ำมันดีเซล แต่จะให้กำลังต่ำกว่าน้ำมันดีเซลปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 น้ำมันหล่อลื่น (Lubricating Oil)

น้ำมันหล่อลื่น เป็นของเหลวที่ช่วยในการหล่อลื่นเครื่องยนต์ หรือเครื่องจักรต่าง ๆ เพื่อลดความฝืดของเครื่องยนต์หรือเครื่องจักรป้องกันการสึกหรอของชิ้นส่วนที่เป็นโลหะ ช่วยระบายความร้อนโดยอาศัยน้ำมันหล่อลื่นเป็นตัวถ่ายเทเพื่อยืดอายุการใช้งานเครื่องจักร เครื่องยนต์ นอกจากนี้ยังเป็นตัวช่วยขจัดคราบสกปรกที่อาจเกาะติดกับชิ้นส่วนของโลหะ และกระจายเขม่า สิ่งสกปรกไม่ให้จับตัวกันเป็นก้อนอีกด้วย

น้ำมันหล่อลื่นผลิตได้จากน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน อาจเป็นน้ำมันแร่หรือน้ำมันสังเคราะห์กับสารเพิ่มคุณภาพที่เหมาะสมกับการใช้งานของน้ำมันหล่อลื่นประเภทนั้น ๆ ดังนั้น น้ำมันหล่อลื่นที่ดีจึงต้องมีสมบัติต่าง ๆ ที่เหมาะสมและเพียงพอต่อการใช้งานแต่ละประเภท น้ำมันหล่อลื่นประกอบด้วย ส่วนที่สำคัญ 2 ส่วน คือ

2.4.1 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน (Base Oils)

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่ใช้อยู่มี 3 สามประเภท ได้แก่ น้ำมันพืชหรือสัตว์ น้ำมันแร่ และน้ำมันสังเคราะห์ แต่ส่วนใหญ่จะใช้น้ำมันแร่เพราะมีคุณภาพดีเพียงพอและราคาถูก น้ำมันชนิดอื่นจะใช้งานที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษ ๆ บางอย่างเท่านั้น

2.4.1.1 น้ำมันพืชหรือสัตว์ (Vegetable or Animal Oil) ในสมัยก่อนมีการใช้งานหลายอย่าง แต่เนื่องจากน้ำมันพืชและน้ำมันสัตว์ก็มีความอยู่ตัวทางเคมีต่ำ เกิดเสื่อมสภาพได้ง่ายขณะใช้งาน จึงต้องผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ ซึ่งราคาก็จะแพงมากขึ้น จึงหมดความนิยมไป น้ำมันพืชที่ใช้ได้แก่ น้ำมันละหุ่ง น้ำมันปาล์ม น้ำมันสัตว์ที่เคยใช้กันได้แก่ น้ำมันหมู น้ำมันปลา ปัจจุบันมีการใช้น้ำมันพืชหรือสัตว์เป็นน้ำมันพื้นฐานน้อยมาก

2.4.1.2 น้ำมันแร่ (Mineral Oils) เป็นน้ำมันพื้นฐานที่ใช้กันมากที่สุด เพราะนอกจากคุณภาพดีแล้วยังราคาถูกด้วย น้ำมันแร่ได้จากการเอาส่วนที่อยู่ก้นหล่อนบรรยากาศ มาผ่านกระบวนการกลั่นภายใต้สุญญากาศ แยกเอาน้ำมันหล่อลื่นชนิดใส และชนิดข้นออกมา ที่เหลือเป็นกากก็นำไปผลิตยางมะตอย ชนิดและปริมาณของน้ำมันแร่ที่แยกออกมาได้ ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันดิบที่นำมากลั่น น้ำมันดิบบางอย่างก็ไม่เหมาะที่จะนำมาผลิตน้ำมันแร่ น้ำมันแร่ที่ได้จากการกลั่นแยกภายใต้สุญญากาศนี้ ปกติจะยังมีคุณภาพที่ไม่ดีพอที่จะนำมาผลิตน้ำมันหล่อลื่น ต้องผ่านกระบวนการต่าง ๆ เพื่อขจัดเอาสารที่ต้องการออก เพื่อให้มีความอยู่ตัวเชิงเคมี และเชิงความร้อนดี น้ำมันแร่ที่นำมาใช้น้ำมันหล่อลื่นแบ่งตามดัชนีความหนืด ซึ่งแบ่งได้เป็นประเภทที่มีดัชนีความหนืดสูง กลาง และต่ำ น้ำมันแร่ที่มีดัชนีความหนืดสูงได้มาจากการกลั่นน้ำมันดิบประเภท พาราฟินิก (Paraffinic) ส่วนน้ำมันแร่ที่มีดัชนีความหนืดปานกลางและต่ำ ได้มาจากน้ำมันประเภท แนฟทานิก (Naphthenic)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1.3 น้ำมันสังเคราะห์ (Synthetic Oils) เป็นน้ำมันที่สังเคราะห์ขึ้นโดยขบวนการทางเคมี วัสดุเริ่มต้นที่ซึ่มักจะมาจากน้ำมันปิโตรเลียม น้ำมันสังเคราะห์ที่ใช้กันมีหลายชนิดแต่ราคาค่อนข้างแพง ในปัจจุบันใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน เฉพาะในงานพิเศษที่ต้องการคุณสมบัติด้านดัชนีความหนืดสูง จุดไหลเทต่ำ และมีการระเหยต่ำ เป็นต้น น้ำมันสังเคราะห์ที่ใช้กันมากมี Polyalphaolefins (PAO), Estes (Diester และ Complex Ester), Polyglycols, Silicone, Halogenated Hydrocarbon and Polypheny Ethers

2.4.2 สารเพิ่มคุณภาพ (Additives)

เครื่องจักรกลและเครื่องยนต์ในปัจจุบันได้รับการออกแบบให้มีขนาดเล็กลง ทำงานเร็วขึ้น และภาระน้ำหนักที่สูงขึ้น น้ำมันหล่อลื่นในเครื่องจักรและเครื่องยนต์ดังกล่าว ต้องประสบกับสภาวะด้านอุณหภูมิ ความเครียด และสภาวะน้ำหนักสูง น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานล้วนๆ มักจะยังมีคุณภาพที่ไม่เพียงพอที่จะทำหน้าที่ต่างๆ ให้ได้ครบถ้วน โดยมีอายุการใช้งานที่ยืนนานตามสมควร ดังนั้นจึงต้องมีการเติมสารเพิ่มคุณภาพในปริมาณที่พอดี เพื่อเพิ่มคุณสมบัติทั้งในด้านเคมี และกายภาพ ของน้ำมันพื้นฐาน ให้ดีเหมาะสมกับงานที่ต้องการ สารเพิ่มคุณภาพมีอยู่มากมายหลายชนิดและประเภท แต่ที่มีใช้กันมากได้แก่

- สารต้านทานปฏิกิริยาออกซิเดชัน
- สารป้องกันการสึกหรอ
- สารป้องกันสนิม
- สารป้องกันการเกิดฟอง
- สารรับแรงกดสูง
- สารเพิ่มดัชนีความหนืด
- สารชะล้าง/กระจายสิ่งสกปรก
- สารเพิ่มความเป็นด่าง

น้ำมันหล่อลื่นมักจะผลิตขึ้นมาเพื่อใช้งานเฉพาะอย่าง เช่น น้ำมันเครื่องยนต์ น้ำมันเกียร์ น้ำมันไฮดรอลิก เป็นต้น ในการที่จะผลิตน้ำมันหล่อลื่นชนิดใดชนิดหนึ่งขึ้นมา นั้น จะมีการพิจารณาถึงหน้าที่ที่ น้ำมันหล่อลื่นนั้น จะต้องกระทำ และสภาวะต่างๆ ที่ น้ำมันหล่อลื่นนั้นจะต้องประสบในขณะที่ทำการหล่อลื่น จากนั้นจึงเลือกสรร น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน และชนิด/ปริมาณของสารเพิ่มคุณภาพที่เหมาะสมกับงานที่ต้องการ จากนั้นจึงมีการทดสอบใช้งานจริง และประเมินเพื่อให้แน่ใจว่า น้ำมันหล่อลื่น ดังกล่าวมีคุณภาพดีตรงความต้องการ น้ำมันหล่อลื่นแต่ละชนิดจึงใช้น้ำมันพื้นฐานชนิดและปริมาณของสารเพิ่มคุณภาพไม่เหมือนกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 คุณสมบัติในการเป็นน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ

น้ำมันหล่อลื่นผลิตได้จากน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน อาจเป็นน้ำมันแร่หรือน้ำมันสังเคราะห์กับสารเพิ่มคุณภาพที่เหมาะสมกับการใช้งานของน้ำมันหล่อลื่นประเภทนั้น ๆ ดังนั้น น้ำมันหล่อลื่นที่ดีจึงต้องมีสมบัติต่าง ๆ ที่เหมาะสมและเพียงพอต่อการใช้งานแต่ละประเภท โดยคุณสมบัติที่เหมาะสมมีดังนี้

-ความหนืด (Viscosity) เป็นคุณสมบัติหนึ่งที่สำคัญมากกับน้ำมันหล่อลื่น เพราะควรมีความหนืดที่เหมาะสมในการสามารถไหลผ่านจุดต่าง ๆ ของเครื่องยนต์ ไม่ควรมีความหนืดมากเกินไปหรือน้อยเกินไป เพราะจะทำให้เกิดการเสียดสีของโลหะได้ง่ายและสึกหรอได้เร็ว ดังนั้นจึงต้องมีการวัดคุณสมบัติด้านการต้านทานการไหลของน้ำมันหล่อลื่น สามารถตรวจสอบคุณภาพความหนืดของน้ำมันด้วย เครื่องทดสอบหาค่าความหนืด

-ดัชนีความหนืด (Viscosity Index) ความหนืดของน้ำมันจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นน้ำมันจะหนืดน้อยลง และจะหนืดมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำลง จึงมีการวัดอัตราการเปลี่ยนแปลงนี้ออกมาเป็นค่าดัชนีความหนืด หรือที่เรียกว่า Viscosity Index (VI) ถ้าน้ำมันหล่อลื่นมีความหนืดเปลี่ยนแปลงน้อยเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงมาก แสดงว่าน้ำมันหล่อลื่นนั้นมีค่า VI สูง ทำให้การหล่อลื่นมีประสิทธิภาพสูง การสึกหรอลดลง แต่ถ้าความหนืดของน้ำมันเปลี่ยนแปลงมากเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยแสดงว่าน้ำมันนั้นมีค่า VI ต่ำ การหล่อลื่นมีประสิทธิภาพต่ำด้วย

-จุดวาบไฟ (Flash Point) คืออุณหภูมิต่ำสุดของน้ำมันที่เกิดเป็นไอในปริมาณที่เพียงพอ เมื่อสัมผัสเปลวไฟจะทำให้เกิดการวาบของเปลวไฟแล้วดับในทันที การวิเคราะห์หาจุดวาบไฟ จะบ่งบอกความปลอดภัยในการเก็บรักษาและการขนถ่าย เพื่อป้องกันการเกิดอัคคีภัยและจุดติดไฟ คือจุดที่อุณหภูมิต่ำสุดของน้ำมันที่จะเกิดไอน้ำมันขึ้น และทำให้มีเปลวไฟลุกขึ้นอย่างต่อเนื่องนานไม่ต่ำกว่า 5 นาที โดยทั่วไปจุดติดไฟจะสูงกว่าจุดวาบไฟประมาณ 5-35 °C

-จุดไหลเท (Pour Point) คือจุดที่อุณหภูมิต่ำสุดที่น้ำมันยังสามารถไหลได้ จะบอกให้ทราบว่าใช้น้ำมันนี้ที่อุณหภูมิต่ำสุดที่เท่าไร เพราะหากใช้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดนี้ น้ำมันจะไม่ไหล ไชในน้ำมันจะอุดตันทางเดินน้ำมันและหม้อกรอง ทำให้อุปกรณ์ทำงานไม่ได้ น้ำมันที่มีปริมาณไชสูงก็จะมีจุดไหลเทที่อุณหภูมิสูง การวิเคราะห์หาจุดไหลเทจึงสามารถบอกความสามารถของการไหลของน้ำมันได้ที่อุณหภูมิต่ำได้

-ความเป็นกรด (Acid Value) ผลจากสารเพิ่มคุณภาพทำให้น้ำมันหล่อลื่นมีฤทธิ์เป็นกรดก่อนการใช้งาน เมื่อใช้งานไปแล้วน้ำมันจะเกิดการเสื่อมสภาพ จากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ปริมาณกรดของน้ำมันสามารถใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการควบคุมคุณภาพได้ และยังสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงการเสื่อมคุณภาพของน้ำมันหล่อลื่นในระหว่างการใช้งานได้อีกด้วย

-การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (Copper Strip Corrosion) การกัดกร่อนแผ่นทองแดงเป็นสมบัติที่แสดงถึงความสามารถในการกัดกร่อนของน้ำมันนั้น ๆ น้ำมันที่มีค่าการกัดกร่อนสูงจะทำให้เกิดผลเสียต่ออุปกรณ์ที่ทำมาจากโลหะทองแดง หรือวัสดุที่มีส่วนผสมของทองแดงอยู่

-ลักษณะการเกิดฟอง (Foaming Characteristics) การเกิดฟองของน้ำมันหล่อลื่นอาจก่อให้เกิดความเสียหายได้ในขณะใช้งาน เช่น ระบบเกียร์ ปัม เนื่องจากถ้าน้ำมันมีฟองมาก อาจทำให้เกิดการหกหล่น หรือเกิดช่องว่างภายในเนื้อน้ำมัน ทำให้น้ำมันไม่สามารถทำหน้าที่หล่อลื่นได้อย่างเต็มที่ หรืออาจทำให้เกิดการสึกหรอได้ โดยปกติแล้วการที่น้ำมันเป็นฟองขณะใช้งานอาจเป็นผลมาจากสารป้องกันการเกิดฟองหมดไป โดยวิธีการทดสอบจะเป่าลมเข้าไปในน้ำมันจนทั่ว ทิ้งไว้ 10 นาทีแล้ววัดฟองที่เกิดไม่ควรเกิน 300 ml.

-ความเป็นด่าง (Total Base Value) การที่น้ำมันหล่อลื่นมีฤทธิ์เป็นด่างก่อนการใช้งาน เป็นผลมาจากสารเพิ่มคุณภาพ และหลังการใช้งานอาจเกิดจากการเสื่อมคุณภาพของน้ำมัน การทดสอบหาปริมาณด่างในน้ำมันสามารถใช้ในการควบคุมคุณภาพของน้ำมันหรือสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงการเสื่อมคุณภาพของน้ำมันขณะใช้งานได้ ส่วนใหญ่จะทดสอบเฉพาะน้ำมันหล่อลื่นยานยนต์

-ความคงตัวต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Stability) ความคงตัวต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเป็นค่าที่บ่งชี้ถึงความเสถียรของน้ำมันต่อการถูกออกซิไดซ์ภายใต้สภาวะที่เร่งให้มีการออกซิไดซ์เกิดขึ้น

-การป้องกันการสึกหรอและการรับแรงกด (Anti Wear) ความสามารถในการต้านทานการสึกหรอหมายถึง คุณสมบัติหล่อลื่นที่สามารถต้านทานการสึกหรอเนื่องจากแรงกดและการขัดสีเป็นหลัก ซึ่งการสึกหรอจะแสดงออกมาในรูปร่องรอยการสึกหรอหรือเนื้อของชิ้นส่วนเครื่องยนต์หรือเครื่องจักรที่สึกหรอไป

โดยคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่ยังไม่เต็มสารเพิ่มคุณภาพจากบริษัท BCP จำกัด ซึ่งแสดงในตารางที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

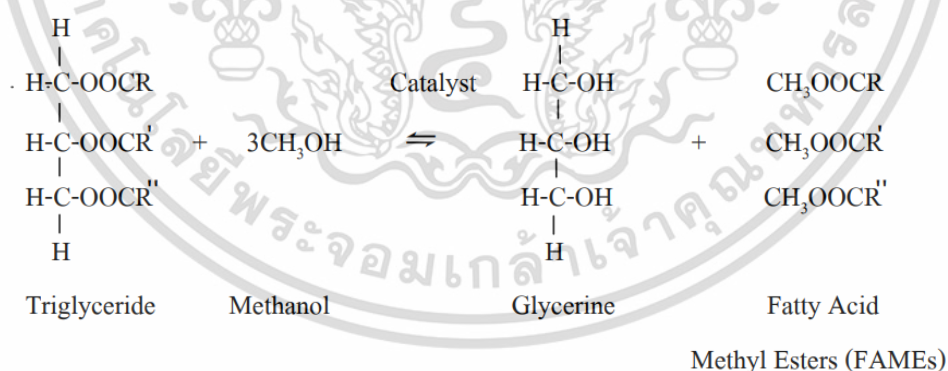
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานปิโตรเลียม

| คุณสมบัติ | วิธีการ | BASE OIL 150SN |
|-----------------------------------|-------------|----------------|
| Kinematic Viscosity @ 40 °C, cSt. | ASTM D 445 | 28.0 - 33.0 |
| Flash Point (COC), °C | ASTMD 92 | 204 |
| Pour Point, °C | ASTM D 5950 | -9 Max |
| Viscosity Index | ASTM D 2270 | 100 |

ที่มา : Base Oil: 150-SN

2.7 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน(Transesterification)

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน คือ ปฏิกิริยาของน้ำมันกับแอลกอฮอล์เพื่อสร้างหมู่เอสเทอร์ และกลีเซอรอลขึ้นมา โดยที่ตัวเร่งปฏิกิริยามักใช้ในการปรับปรุงอัตราการเกิดของปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์ที่ได้ เนื่องจากปฏิกิริยาสามารถย้อนกลับได้ จึงอาจมีการใช้แอลกอฮอล์ที่มากจนเกินไป ดังนั้นเพื่อปรับสมดุลทางด้านผลิตภัณฑ์ แอลกอฮอล์ที่ใช้ควรเป็นแอลกอฮอล์แอลไอฟาติกชนิดปฐมภูมิและทุติยภูมิที่มีอะตอมของคาร์บอน 1 ± 8 (Sprules และ Price, 1950).



ภาพที่ 2.6 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันของ triglycerides เป็นน้ำมันไบโอดีเซล

ที่มา : Srivastava and Prasad (1999)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในแอลกอฮอล์ทั้งหมดที่สามารถนำมาใช้ในกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริเคชันได้มีดังนี้ เมทานอล เอทานอล โพรพานอล บิวทานอล และอะมิลแอลกอฮอล์ เมทานอล และเอทานอลพบว่ามีการใช้งานกันบ่อยที่สุด เนื่องจากมีต้นทุนต่ำและข้อดีทั้งทางกายภาพและทางเคมี (แอลกอฮอล์แบบมีขั้วและแบบโซ่สั้นที่สุด) ซึ่งสามารถตอบสนองได้อย่างรวดเร็วกับไตรกลีเซอไรด์และ NaOH และสามารถละลายได้ง่าย โดยในการเติมเมทานอลต่อน้ำมันที่อัตราส่วน 3:1 โดยอัตราส่วนจะต้องสูงขึ้นเพื่อสมดุลให้ได้ผลผลิตเอสเทอร์สูงสุด ปฏิกิริยาสามารถเร่งด้วยกรด และเอนไซม์ ในตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นต่างจะประกอบด้วย NaOH, KOH, คาร์บอนเนต โซเดียมและโพแทสเซียมอัลคอกไซด์ เช่น โซเดียมเมทอกไซด์ โซเดียมเอทอกไซด์ โซเดียมโพรพอกไซด์ และโซเดียมบิวออกไซด์ กรดซัลฟิวริก กรดไฮโดรคลอริกมักใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยากรด ยังสามารถใช้เป็น Biocatalysts ได้ด้วย ตัวเร่งปฏิกิริยาอัลคาไลสามารถเกิดปฏิกิริยาได้เร็ว อีกทั้งการผลิตด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริเคชันจะพบมากในการผลิตเชิงพาณิชย์เป็นส่วนมาก แต่การใช้กรด และต่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีความไวต่อน้ำเป็นอย่างมาก ทำให้ต้องแน่ใจว่าการผลิตต้องแน่ใจว่าไม่มีน้ำในกระบวนการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริเคชัน เพราะน้ำทำให้เกิดปฏิกิริยาบางส่วนเปลี่ยนเป็น สaponification ซึ่งจะผลิตสบู่ออกมา โดยที่สบู่จะลดผลิตภัณท์ของเอสเทอร์ และทำให้การแยกเอสเทอร์กับกลีเซอรอล และการล้างด้วยน้ำยากยิ่งขึ้น ปริมาณกรดไขมันอิสระที่ต่ำของกลีเซอรอลจำเป็นต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริเคชัน ที่เร่งปฏิกิริยาด้วยต่าง ถ้ามากเกินไปและกรดไขมันอิสระที่อยู่ในไตรกลีเซอไรด์ จะต้องใช้ทรานส์เอสเทอร์ริเคชันที่เร่งด้วยกรด โดยที่ไตรกลีเซอไรด์สามารถทำให้บริสุทธิ์โดยการสaponification (การบำบัดด้วยต่าง) และทรานส์เอสเทอร์ริเคชันโดยใช้ต่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

2.7.1 ผลของความชื้น และกรดไขมันอิสระ

สังเกตว่าน้ำมันพืชสำหรับการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ริเคชันโดยใช้ต่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาว่าไม่ควรมีความชื้นมากกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ เมื่อมีความชื้นมากกว่านั้นจะจำเป็นต้องใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์มาก เพื่อทำให้กรดไขมันเป็นกลาง โดยความชื้นจะทำให้เกิดสบู่ โดยที่สบู่ที่เกิดขึ้นจะทำให้มีความหนืดมากขึ้น และเกิดเจลทำให้การแยกชั้นของไบโอดีเซล และกลีเซอรอลทำได้ยาก ซึ่งส่งผลต่อผลิตภัณท์ไบโอดีเซลที่ได้

2.7.2 ผลของอัตราส่วนโมลของแอลกอฮอล์

อัตราส่วนโมลาร์ของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันเป็นหนึ่งในตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลต่อผลิตภัณท์ไบโอดีเซล โดยที่ต้องใช้แอลกอฮอล์สามต่อหนึ่งโมลของไตรกลีเซอไรด์ ในทางปฏิบัติแอลกอฮอล์ส่วนเกินจะถูกใช้เพื่อปรับสมดุลไปสู่การผลิตเอสเทอร์ที่มากขึ้น ผลผลิตเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่ส่งผลต่อการทำกำไรในการผลิตเชิงพาณิชย์ ดังนั้นจึงเป็นเรื่องสำคัญที่จะต้องบรรจุการแปลงสภาพเอสเทอร์ริเคชันของ TG และ FFA ที่เกือบ 100 เปอร์เซ็นต์ และผลผลิตที่ต่ำกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ไม่ได้เป็นประโยชน์ในเชิงพาณิชย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.3 ผลของความเข้มข้น และชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้จะเป็นสารประเภทอัลคาไล กรดหรือเอนไซม์ ทรานส์เอสเทอร์ิเคชันที่เร่งปฏิกิริยาด้วยอัลคาไลจะทำปฏิกิริยาได้เร็วกว่าการใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยามาก แต่ถ้ากลีเซอไรด์มีปริมาณกรดไขมันอิสระและน้ำมาก การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันโดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดจะมีความเหมาะสมมากกว่า และการใช้ต่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้เกิดปฏิกิริยาสaponifiเคชัน หรือก็คือทำให้เกิดสบู่ ส่งผลต่อปริมาณ และคุณภาพของไบโอดีเซลแล้วยิ่งหากใช้ความเข้มข้นของต่างในปริมาณที่มากไป แต่ตัวเร่งที่เป็นต่างจะนิยมมากกว่า กรดเพราะเกิดปฏิกิริยาได้เร็วกว่า

2.7.4 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยา

อัตราการเปลี่ยนแปลงจะเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ในงานวิจัยก่อนหน้านี้สรุปว่าปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่มีการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้ เมื่อปฏิกิริยาดำเนินเข้าสู่ภาวะสมดุลแล้ว อัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าจะเท่ากับอัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับในกระบวนการผลิตที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา อาจต้องใช้เวลาพอสมควรในการเข้าสู่ภาวะสมดุล เพื่อให้เกิดการถ่ายเทมวลของสารตั้งต้นมายังพื้นผิวที่มีความไวต่อตัวเร่งปฏิกิริยาและเกิดปฏิกิริยากลายเป็นผลิตภัณฑ์

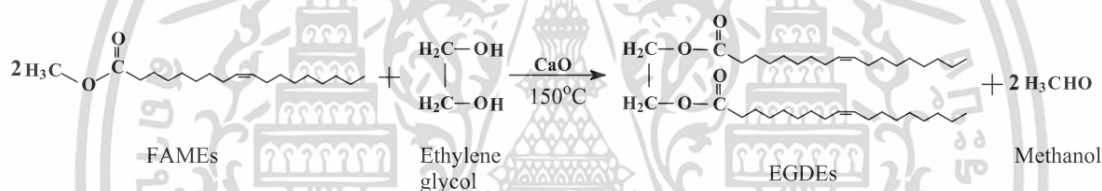
2.7.5 ผลของอุณหภูมิในระหว่างการทำปฏิกิริยา

ทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันอาจเกิดมาจากอุณหภูมิที่ต่างกัน ขึ้นอยู่กับน้ำมันที่ใช้ ยกตัวอย่างในงานวิจัยของ Gou sun และคณะ (2017) ได้ทำการศึกษาการผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพจากน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วด้วยปฏิกิริยา double transesterification เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม โดยใช้ Superior alcohol คือ trimethylolpropane และตัวเร่งปฏิกิริยา คือ ไฮโดรทัลไซด์ที่โหลดด้วยโพแทสเซียมคาร์บอเนต (HT/K₂CO₃) โดยสภาวะที่เหมาะสมคือ อัตราส่วน FAME ต่อ TMP(3:1), ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (2% w/w), ความดัน(300Pa), เวลา(2 ชั่วโมง) โดยใช้อุณหภูมิที่ต่างกันที่ 130°C,140°C,150°C,160°C และ170°C พบว่าในช่วงอุณหภูมิที่ 130-150°C ยังให้ผลผลิตไม่ถึง 80% แต่เมื่อถึงที่อุณหภูมิ 160°C สามารถได้ผลผลิตเพิ่มขึ้นถึง82.5% และเมื่อถึง 170°C ผลผลิตก็ลดลง จึงสรุปได้ว่าอุณหภูมิมีอิทธิพลอย่างชัดเจนต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาและผลผลิตเอสเทอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 เอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol)

พอลิไฮดรอกซีแอลกอฮอล์เอทิลีนไกลคอลเป็นโพลีออลเอสเทอร์จะมีความเสถียรทางเคมีมาก สามารถผสมกับน้ำมันพื้นฐานและสารเติมแต่งอื่นๆเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามที่กำหนด เอทิลีนไกลคอลเป็น Cleaner ที่สามารถกำจัดคราบวานิชหรือคราบตะกอนน้ำมันได้ โดยจากการศึกษาของ N.K. Attia (2020) ได้ทำการศึกษาการใช้เอทิลีนไกลคอลเป็นตัวแอลกอฮอล์ ในการสังเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ โดยพบว่า โครงสร้างของเอทิลีนไกลคอลส่งผลต่อความหนืดและการทนความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ เนื่องจากโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้นทำให้สามารถทนความร้อนเพิ่มขึ้น และเนื่องจากมีคาร์บอนจากเอทิลีนไกลคอลไปเกาะโซ่คาร์บอนในโครงสร้างของ FAME ทำจำนวนคาร์บอนเยอะขึ้น ยาวเป็นโซ่ตรง (Paraffin) ดังภาพที่ 2.7 ส่งผลให้มีความหนืดเพิ่มขึ้น ค่าจุดไหลเทต่ำ จุดวาบไฟสูง เหมาะสมต่อคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น



ภาพที่ 2.7 การสังเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพจากเอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol)

ที่มา : N.K. Attia และคณะ (2020)

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

น้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก และมีการกำจัดอย่างผิดวิธีทำให้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จึงมีการศึกษาการนำน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วมาเพิ่มมูลค่า ใช้ต้นทุนต่ำ และเป็นการใช้ทรัพยากรหมุนเวียน จากงานวิจัย Andrew Nosakhare Amenaghawon และคณะ (2022) ได้ทำการศึกษาการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วด้วยปฏิกิริยา Transesterification โดยแอลกอฮอล์ที่ใช้ในกระบวนการคือ เมทานอล (Methanol) และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้คือเปลือกปูและเปลือกต้นแปลนทิน (Crab shell and plantain peels) ทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล โดยอัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมัน (13.03:1), ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (5%wt), อุณหภูมิ(60°C), และเวลา (149.94 นาที) ได้ผลผลิต FAME 93% ซึ่ง

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถือว่าได้ผลผลิตที่น่าพอใจ หลังจากนำไปตรวจสอบคุณสมบัติไบโอดีเซลเทียบกับมาตรฐาน ASTM D6571 และ EN 14214 พบว่าเป็นไปตามข้อกำหนด ซึ่งการเลือกใช้อัลกอฮอล์จะส่งผลต่อคุณสมบัติของน้ำมัน และการเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะส่งผลต่อผลผลิตเนื่องจากการเกิดสบู่จะทำให้ผลผลิตลดลง

หลังจากสามารถผลิตน้ำมันไบโอดีเซลแล้วยังสามารถนำมาผลิตเป็นน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพได้ ซึ่งถือว่าเป็นการใช้ประโยชน์ได้ 2 ต่อจากการนำน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วกลับมาใช้ โดยจากงานวิจัยของ Gou Sun และคณะ (2017) ได้ทำการศึกษาการผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพจากน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วด้วยปฏิกิริยา double transesterification เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม โดยใช้ Superior alcohol คือ trimethylolpropane และตัวเร่งปฏิกิริยา คือ ไฮโดรทัลไซต์ที่โหลดด้วยโพแทสเซียมคาร์บอเนต ($\text{HT}/\text{K}_2\text{CO}_3$) โดยสภาวะที่เหมาะสมคือ อัตราส่วน FAME ต่อ TMP(3:1), ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (2% w/w), อุณหภูมิ(160°C), ความดัน(300 Pa), เวลา(2 ชั่วโมง) ได้ผลผลิต TFATE 82.5% จะเห็นว่าการ transesterification รอบที่สองนั้นจะมีการใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นมาก จึงต้องทำปฏิกิริยาในสภาวะสูญญากาศ หลังจากได้ผลผลิตแล้วมีการปรับปรุงการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{HT}/\text{K}_2\text{CO}_3$ โดยการเผาตัวเร่งปฏิกิริยา K_2CO_3 30% ที่ 500°C เพื่อเพิ่มผลผลิต TFATE จาก 82.5% เป็น 93.89% และอีกงานวิจัยของ Beatriz Angulo และคณะ (2018) ได้ทำการศึกษาการผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพจากน้ำมันปลาด้วยปฏิกิริยา double transesterification โดยใช้ alcohol คือ trimethylolpropane และตัวเร่งปฏิกิริยา คือ โซเดียมเอท็อกไซด์ (EtONa) สภาวะที่เหมาะสมคือ อัตราส่วน FAME ต่อ TMP(4:1), ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (1% w/w), อุณหภูมิ(140°C), ความดัน(1 mbar), เวลา(6 ชั่วโมง) ได้ผลผลิต 78% หลังจากได้ผลิตภัณฑ์แล้วนำไปตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ พบว่ามีความเหมาะสมกับคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพโดยค่าความหนืดที่ 100°C อยู่ที่ 5.81, ค่าดัชนีความหนืดอยู่ที่ 211, จุดไหลเทอยู่ที่ -6°C และจุดวาบไฟอยู่ที่ 204°C ซึ่งการศึกษาล่าสุดของ N.K. Attia และคณะ (2020) ได้ทำการศึกษาการผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพโดยใช้น้ำมันพื้นฐานที่ต่างกัน ได้แก่ น้ำมันจากทานตะวัน ถั่วเหลือง สบู่ดำ และน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพที่ได้ โดยใช้แอลกอฮอล์คือ เอทิลีนไกลคอล (ethylene glycol) และใช้แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยตัวแปรที่เหมาะสมคือ FAME ต่อ EG(2:1), ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (1.2% w/w), อุณหภูมิ(150°C), ความดัน(10 mbar), เวลา(2 ชั่วโมง) หลังจากนั้นนำไปวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของสารหล่อลื่นชีวภาพโดย FTIR spectroscopy, ประเมินเสถียรภาพทางความร้อน (TGA), การวัดจุดเท(ASTM), วัดความหนืด, ดัชนีความหนืด และพฤติกรรมทางสีโอโลยี พบว่าน้ำมันทั้ง 4 ชนิดมีคุณสมบัติผ่านเกณฑ์ของน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 วัสดุดิบและสารเคมี

3.1 วัสดุดิบ

น้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว

น้ำมันไปโอดีเซล

3.2 สารเคมี

8.2.1 กรดซัลฟิวริก (AR Grade, Merck, ประเทศเยอรมัน)

8.2.2 โพแทสเซียมคาร์บอเนต (AR Grade, M&P IMPEX, ประเทศออสเตรเลีย)

8.2.3 เอทิลีนไกลคอล (M&P IMPEX, ประเทศออสเตรเลีย)

8.2.4 เมทานอล (AR Grade, I.C.P Chemicals, ประเทศไทย)

8.2.5 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (AR Grade, Qrec, ประเทศนิวซีแลนด์)

3.2 อุปกรณ์

เครื่องปฏิกรณ์ (S P GLASS, ประเทศไทย)

เครื่องชั่งน้ำหนัก (S P GLASS, ประเทศไทย)

เครื่องกวนตีใบพัด (IKA, ประเทศไทย)

ช้อนตักสาร (M&P IMPEX, ประเทศออสเตรเลีย)

อ่างควบคุมอุณหภูมิแบบหมุนวน (Polyscience, ประเทศสหรัฐอเมริกา)

แท่งแม่เหล็กกวนสาร

Hot plate (IKA, ประเทศเยอรมัน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขวดก้านกลม (Glassco,ประเทศอังกฤษ)

บีกเกอร์ขนาด 250,600 และ 1000 ml (SCHOTT Duran,ประเทศเยอรมัน)

กรวยแยกสารขนาด 1000 ml (Witeg, ประเทศเยอรมัน)

กรวยกรอง (BT,ประเทศไทย)

เทอร์โมมิเตอร์ (SK SATO,Monet Asia, ประเทศไทย)

ขวดรูปชมพู่ (S P GLASS, ประเทศไทย)

กระบอกตวง (Kartell,ประเทศอิตาลี)

ชุดควบแน่น (S P GLASS, ประเทศไทย)

บีมลสมุญญากาศ

เครื่องให้ความร้อน (IKA,ประเทศเยอรมัน)

เครื่องวัดความหนืด (Brookfield viscometer,ประเทศอเมริกา)

เครื่องวัดความหนาแน่น (Density Meter,ประเทศญี่ปุ่น)

เครื่องวัดจุดวาบไฟ (Flash point Tester,ประเทศจีน)

เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบโครงสร้างทางเคมี (FTIR Spectroscopy,ประเทศสหรัฐอเมริกา)

เครื่องวัดจุดไหลเท (Pour Point Tester,ประเทศญี่ปุ่น)

เครื่องวิเคราะห์ความเสถียรทางความร้อน (Thermogravimetric Analysis TGA,ประเทศสหรัฐอเมริกา)

เครื่องวัดระยะเหี่ยวนำการเกิดออกซิเดชัน (Calorimeter DSC,ประเทศจีน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมไบโอดีเซล

ขั้นตอนการสังเคราะห์น้ำมันไบโอดีเซลดังภาพที่ 3.2 สามารถอธิบายได้ดังนี้ ขั้นแรกเตรียมน้ำมันปริมาตร 500มล. ที่กรองเศษอาหารหรือสิ่งเจือปนต่างๆออกด้วยผ้าขาวบาง จากนั้นนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 110°C เพื่อไล่ความชื้นออก จากนั้นเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ (1%w/w) และแอลกอฮอล์เมทานอล (33%v/v) มาผสมกันโดยการกวนแบบไม่ให้ความร้อนรอประมาณ 10-15 นาทีหรือจนกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาจะละลายหมด เมื่อละลายเข้ากันแล้วนำน้ำมันที่เตรียมไว้ผสมกับแอลกอฮอล์ที่เตรียมไว้ข้างต้น ในเครื่องปฏิกรณ์แก้วที่อุณหภูมิ 65°C เป็นเวลา 120 นาทีที่รอบการกวน 290 RPM เมื่อครบกำหนดเวลาย่น้ำมันออกจากเครื่องปฏิกรณ์เทลงในกรวยแยกแล้วตั้งทิ้งไว้ 2-3 ชั่วโมง หรือจนกว่าจะแยกชั้นระหว่างเมทิลเอสเทอร์ และกลีเซอรอล ดังภาพที่ 3.1 เมื่อแยกชั้นดีแล้วใช้ส่วนกลีเซอรอลออกแล้วล้างด้วยกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ที่เจือจางในน้ำกลั่น 1% ผสมให้เข้ากันแล้วรอแยกชั้น หลังจากแยกชั้นครั้งที่สองแล้วใช้เอาส่วนอื่นออกให้เหลือเพียงน้ำมันไว้ และล้างด้วยน้ำกลั่นทำขั้นตอนเหมือนขั้นตอนก่อนหน้าซ้ำๆ จนกว่าจะใส สุดท้ายนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 110°C เพื่อเอาความชื้นออกให้ได้มากที่สุด และทิ้งให้เย็นลง



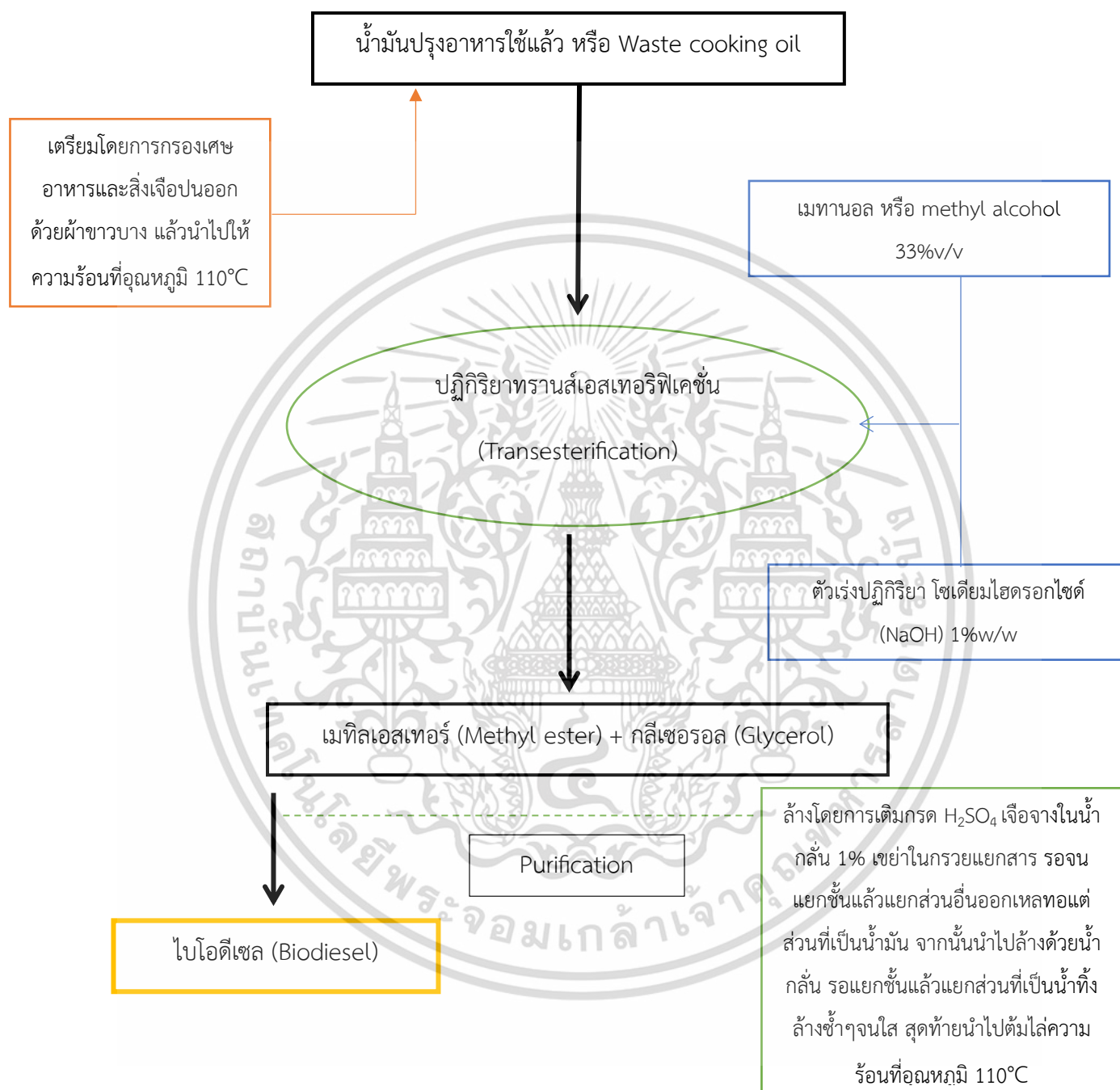
ภาพที่ 3.1 แสดงการแยกชั้นระหว่างเมทิลเอสเทอร์ (Biodiesel) และกลีเซอรอล

ปริมาณร้อยละผลผลิตของไบโอดีเซลคำนวณดังสมการ (1)

$$\text{ร้อยละผลผลิตของไบโอดีเซล (\%)} = \frac{\text{ปริมาณของไบโอดีเซล (มล.)}}{\text{ปริมาณของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว (มล.)}} \times 100 \quad (1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการสังเคราะห์น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วโดยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน



ภาพที่ 3.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วโดยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การสังเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

ขั้นตอนการสังเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพดังภาพที่ 3.4 สามารถอธิบายได้โดย ขั้นตอนแรกนำไบโอดีเซล(FAMEs)ที่เตรียมไว้ เทลงในขวดก้นกลมที่ต่อกับชุดรีฟลักซ์คอนเดนเซอร์ดังภาพที่ 3.3 จากนั้นให้ความร้อนกับน้ำมันที่อยู่ในอ่างด้วย Hot plate และแท่งกวนแม่เหล็กให้ถึงอุณหภูมิ 110°C จากนั้นเติมเอทิลีนไกลคอล 15.5 กรัม ที่ผสมกับโพแทสเซียมคาร์บอเนต 1.5 กรัม ควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ที่ 110°C แล้วจับเวลา 135 นาที โดยใช้ชุดรีฟลักซ์คอนเดนเซอร์ในการควบแน่นเมทานอลที่เป็น by product ออกเพื่อป้องกันการทำปฏิกิริยาย้อนกลับ เมื่อเสร็จแล้วนำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาแยกชั้นและล้างด้วยกรดซัลฟิวริก 1% ที่อุณหภูมิ 80°C โดยล้างครั้งละ 50% ของปริมาณผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ จากนั้นนำไปต้มไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 100-120°C จนกว่าน้ำมันจะใส แล้วจึงนำตัวอย่างที่ได้มากรอง จนได้เป็นน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ เพื่อนำไปวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพ



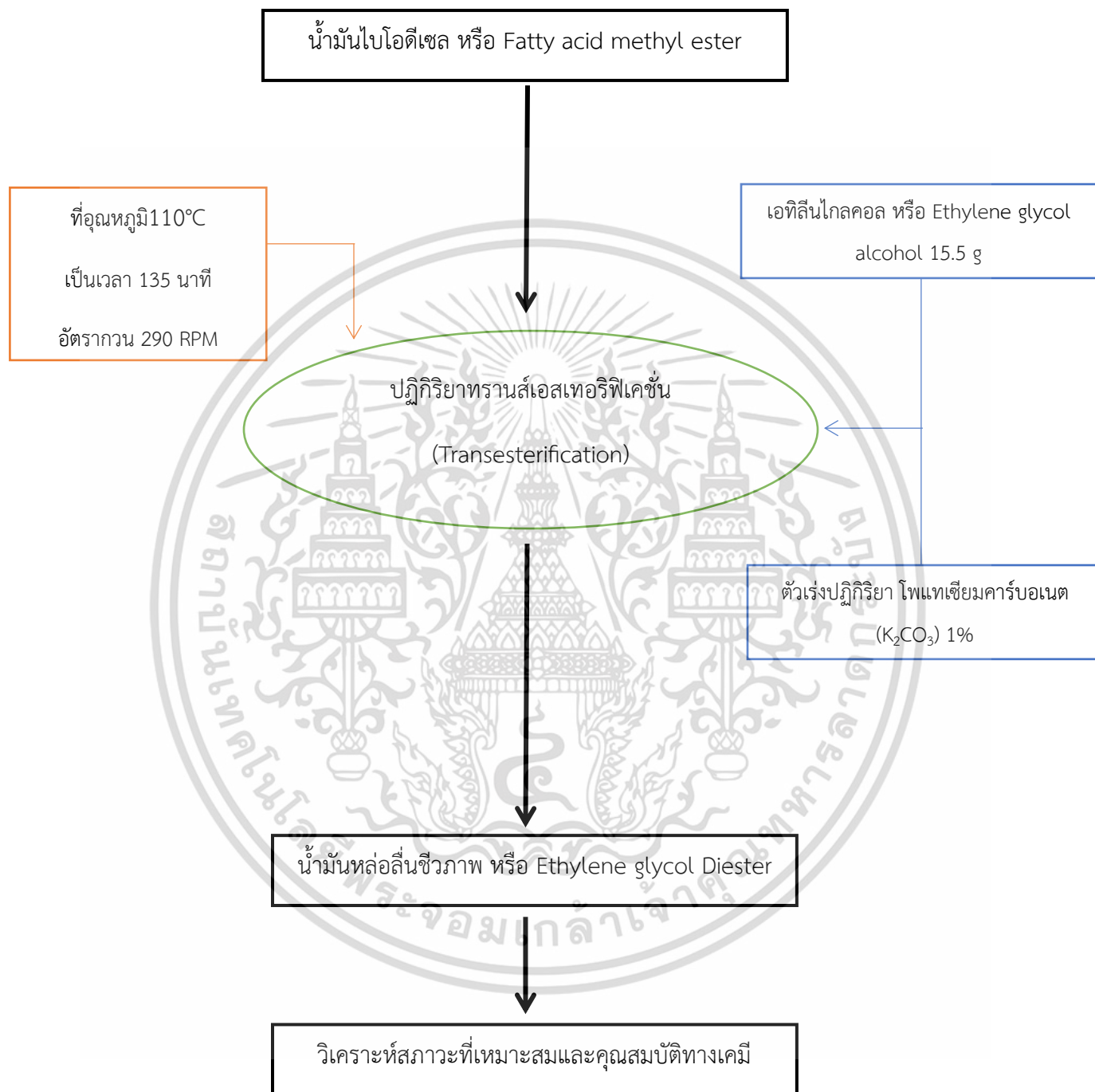
ภาพที่ 3.3 ขวดก้นกลมที่ต่อกับชุดรีฟลักซ์คอนเดนเซอร์

ปริมาณร้อยละผลผลิตของน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ คำนวณดังสมการ (2)

$$\text{ร้อยละผลผลิตของน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ (\%)} = \frac{\text{ปริมาตรของน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ (มล.)}}{\text{ปริมาตรของน้ำมันไบโอดีเซล (มล.)}} \times 100 \quad (2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการสังเคราะห์ น้ำมัน Bio-lubricant จาก น้ำมัน Biodiesel



ภาพที่ 3.4 ขั้นตอนการสังเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ (Bio-lubricant) จากน้ำมันไบโอดีเซล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติของสารหล่อลื่นชีวภาพ

ตารางที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติ เครื่องมือวิเคราะห์ และวิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์หาคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ

| | Property | Equipment | Method |
|---|---------------------|--------------------|------------|
| 1 | Viscosity | Viscometer | ASTM D445 |
| 2 | Viscosity Index | calculator | ASTM D2270 |
| 3 | Flash Point | Flash Point Tester | ASTM D92 |
| 4 | Total acid Number | Titration | ASTM D974 |
| 5 | FTIR Scan | FTIR Spectroscopy | ASTM E2412 |
| 6 | Oxidation stability | RPOVT tester | ASTM D2272 |

3.4.1 การหาความหนืด (Viscosity)

การหาความหนืดโดยวิธีมาตรฐาน ASTM D445 มีขั้นตอนการวิเคราะห์คือ เติมห่วงอย่างลงในเครื่องวัดความหนืด(Viscometer)แล้วจึงใช้จุกยางดูดดูดตัวอย่างจากหลอดเล็กจนผิวของตัวอย่างอยู่ในจุดที่กำหนด แล้วจึงปล่อยตัวอย่างไหลไปโดยดึงจุกยางออก เริ่มจับเวลาเมื่อปล่อยของไหลลงตามแรงโน้มถ่วงและหยุดจับเวลาเมื่อตัวอย่างผ่านจุดที่กำหนด คำนวณค่า kinematics viscosity จากสูตร $V=CT$ โดย V คือ kinematics viscosity, C คือค่าคงที่มาตรฐานของเครื่อง, T คือเวลาที่ใช้ในการไหลโดยมีหน่วยเป็นวินาที

3.4.2 การหาดัชนีความหนืด (Viscosity Index)

การทดสอบ ASTM D2270 มาตรฐานนี้ระบุขั้นตอนในการคำนวณดัชนีความหนืดของผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม เช่น น้ำมันหล่อลื่นและวัสดุที่เกี่ยวข้องจากความหนืดจลนศาสตร์ที่ 40 °C และ 100 °C ค่าความหนืดจลนศาสตร์ถูกกำหนดโดยอ้างอิงถึง 20.00 mm²/s ที่ 2 °C สำหรับน้ำกลั่น การกำหนดความหนืดจลนศาสตร์ของผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมควรทำตามวิธีการทดสอบ D445 , D7042 , IP 71 หรือ ISO 3104

หากดัชนีความหนืดที่คำนวณโดยใช้การวัดความหนืดจลนศาสตร์จากวิธีทดสอบที่แตกต่างกันสำหรับตัวอย่างที่กำหนดไม่สอดคล้องกัน ค่าที่คำนวณจากการวัดวิธีทดสอบ D445 จะเป็นที่ยอมรับ ค่าที่ระบุในหน่วย SI ควรเป็นที่ยอมรับตามมาตรฐาน ไม่มีหน่วยวัดอื่นรวมอยู่ในมาตรฐานนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 การหาค่าจุดวาบไฟ (Flash Point)

การหาจุดวาบไฟโดยวิธีการหามาตรฐาน ASTM D92 มีขั้นตอนการวิเคราะห์คือ การใช้ทองเหลืองในถ้วยทดสอบและฝาปิดผ่านจุดระเบิด โดยจะถูกให้ความร้อนและกวนในอัตราที่กำหนด การทดสอบสิ้นสุดลงด้วยการสังเกตแสงวาบในถ้วยซึ่งอุณหภูมิเป็นของเหลวของจุดวาบไฟ

3.4.4 การหาค่าความเป็นกรด (Total acid Number)

ค่าความเป็นกรดที่วัดออกมาเป็นหน่วยมิลลิกรัมต่าง KOH/กรัม น้ำมัน เช่นเดียวกันกับค่าความต่าง แสดงถึงปริมาณของกรดทั้งหมดที่มีอยู่ในน้ำมันหล่อลื่นวัดได้ 2 วิธีคือ โดยวิธี ASTM D - 664 และ ASTM D-974 สำหรับน้ำมันหล่อลื่นไม่ว่าจะเป็นงานหล่อลื่นชนิดใดต้องไม่มีกรดแก่อยู่ในน้ำมัน เพราะกรดแก่จะทำการกัดกร่อนโลหะทำให้เกิดความเสียหาย ตรวจสอบค่าปริมาณกรดแก่ในน้ำมันโดยวิธี ASTM D - 664 หรือ ASTM D-974 เช่นกัน

3.4.5 การหาค่าหุ้ฟงักซันของโมเลกุล (FTIR Scan)

การหาหุ้ฟงักซันของโมเลกุลโดยวิธีการหามาตรฐาน ASTM E2412 การวิเคราะห์คือ วิเคราะห์แนวโน้มด้วยเครื่องวัดสเปกตรัมอินฟราเรดฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม (FTIR) โดย Software ในการวัดตัวอย่าง โดยเลขคลื่น (Wavenumber) สำหรับการทดสอบมีความเข้มของการดูดกลืนแสงที่แน่นอนขึ้นอยู่กับความละเอียดของสเปกตรัมและความยาวเส้นทางของเซลล์ที่ใช้ ทั้งยังสามารถวิเคราะห์สภาพการทำงานของเครื่องตามสภาวะความผิดปกติที่สังเกตพบในตัวอย่าง

3.4.6 การต้านทานการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation Stability)

เครื่องทดสอบความเสถียรในการออกซิเดชันของถังแรงดันแบบโรตารีได้รับการออกแบบและผลิตตามมาตรฐานอุตสาหกรรมของสาธารณรัฐประชาชนจีน SH/T 0193 น้ำมันหล่อลื่น-การหาค่าความเสถียรของปฏิกิริยาออกซิเดชัน-วิธีถังแรงดันแบบหมุน และ ASTM D2272 วิธีทดสอบมาตรฐานสำหรับความเสถียรในการออกซิเดชันของน้ำมันก๊าดหนืดโดย ภาชนะความดันหมุน เครื่องมือนี้ใช้เพื่อระบุความเสถียรในการออกซิเดชันของก๊าดหนืดที่มีองค์ประกอบเดียวกัน (น้ำมันพื้นฐานและสารเติมแต่ง) นอกจากนี้ยังสามารถใช้เพื่อระบุน้ำมันฉนวนแร่ใหม่ที่มี 2,6-BHT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์สารหล่อลื่นชีวภาพจากน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วโดยปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้การทดลองแบบ Box-Behnken design มีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง 3 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิ(T) เวลา(t) และอัตราส่วนโมลาร์ของสารตั้งต้น (FAME : EG) โดยขอบเขตของปัจจัยที่ศึกษาแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ปัจจัยและระดับการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken design

| ปัจจัย | สัญลักษณ์ | หน่วย | ระดับ | |
|------------------------------|-----------|-------|--------|--------|
| | | | ต่ำสุด | สูงสุด |
| อุณหภูมิ | X_1 | °C | 110 | 130 |
| เวลา | X_2 | Min | 120 | 240 |
| อัตราส่วนโมลาร์ของสารตั้งต้น | X_3 | Ratio | 1 | 3 |

เมื่อกำหนดขอบเขตการทดลองแล้ว ทำการออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab โดยในงานวิจัยนี้มีการออกแบบงานวิจัยแบบ Box-Behnken design เนื่องจากตัวแปรที่ศึกษาเป็นปัจจัยเชิงปริมาณ สามารถประมาณผลกระทบในรูปของพหุนามอันดับสอง และผลกระทบร่วม 2 ปัจจัยได้ ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken แสดงจำนวนครั้งของการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพจากน้ำมันไบโอดีเซลโดยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ทั้งหมด 30 วัน

| RunOrder | Factor | | | Response |
|----------|-----------|------------|-------------------|----------|
| | Temp (°C) | Time (Min) | FAME : EG (Ratio) | |
| 1 | 110 | 120 | 2 | %yield |
| 2 | 130 | 120 | 2 | |
| 3 | 110 | 240 | 2 | |
| 4 | 130 | 240 | 2 | |
| 5 | 110 | 180 | 1 | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | | | |
|----|-----|-----|---|
| 6 | 130 | 180 | 1 |
| 7 | 110 | 180 | 3 |
| 8 | 130 | 180 | 3 |
| 9 | 120 | 120 | 1 |
| 10 | 120 | 240 | 1 |
| 11 | 120 | 120 | 3 |
| 12 | 120 | 240 | 3 |
| 13 | 120 | 180 | 2 |
| 14 | 120 | 180 | 2 |
| 15 | 120 | 180 | 2 |
| 16 | 110 | 120 | 2 |
| 17 | 130 | 120 | 2 |
| 18 | 110 | 240 | 2 |
| 19 | 130 | 240 | 2 |
| 20 | 110 | 180 | 1 |
| 21 | 130 | 180 | 1 |
| 22 | 110 | 180 | 3 |
| 23 | 130 | 180 | 3 |
| 24 | 120 | 120 | 1 |
| 25 | 120 | 240 | 1 |
| 26 | 120 | 120 | 3 |
| 27 | 120 | 240 | 3 |
| 28 | 120 | 180 | 2 |
| 29 | 120 | 180 | 2 |
| 30 | 120 | 180 | 2 |

%yield

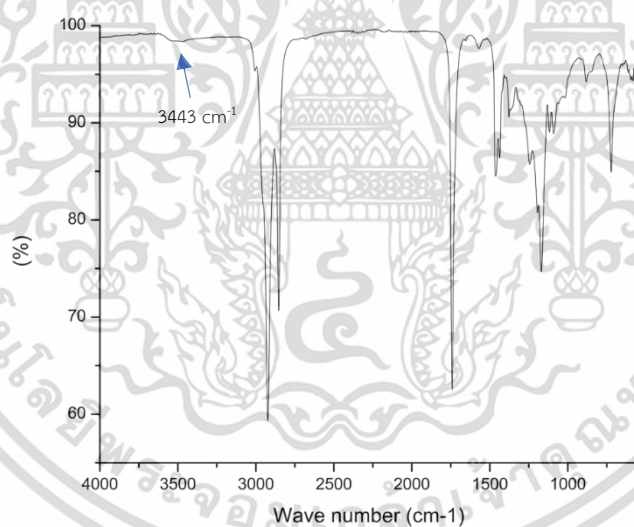
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 ผลการศึกษาการสังเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพจากไบโอดีเซล

จากการศึกษาการสังเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพจากน้ำมันไบโอดีเซลโดยใช้เอทิลีนไกลคอลเป็นแอลกอฮอล์ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken design เพื่อเพิ่มจำนวนคาร์บอนในกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์และได้เมทานอลเป็นผลพลอยได้ ทำการทดลองทั้งหมด 7 ครั้ง เพื่อตรวจหมู่ฟังก์ชัน FTIR และค่าความหนืด พบว่าที่อุณหภูมิ 120°C, เวลา 180 นาที, อัตราส่วน FAME:EG คือ 2:1 และปริมาณ K_2CO_3 1%w/w มีหมู่ฟังก์ชัน FTIR ดังภาพที่ 4.1 พีคที่ 3443 cm^{-1} เป็นการแสดงถึงการยึดตัวของไฮดรอกซิล O-H ซึ่งบ่งบอกถึงการรวมกันของเอทิลีนไกลคอลและไบโอดีเซลของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันได้เป็นน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ และค่าความหนืดที่เหมาะสมที่สุดที่ 8.51 cSt



ภาพที่ 4.1 FTIR spectrum จากการทดลองสังเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพจาก WCO ด้วยการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

การผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพโดยใช้สภาวะที่ต่างกันออกแบบการทดลองด้วย box-Behnken design ซึ่งจะใช้ช่วงของแต่ละปัจจัยในการผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพคือ 1.อุณหภูมิในช่วง 110-130°C 2.เวลาในช่วง 120-240 นาที 3.ร้อยละโดยอัตราส่วนของ FAMEต่อเอทิลีนไกลคอลในช่วง 1-3 โดยร้อยละผลผลิตจะแสดงในตารางที่ 4.1 มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 18-95

ตารางที่ 4.1 แสดงร้อยละผลผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพตามการออกแบบการทดลอง box-Behnken design

| ลำดับ | อุณหภูมิ (°C) | เวลา (นาที) | อัตราส่วน FAME:EG | %Yield |
|-------|---------------|-------------|-------------------|--------|
| 1 | 110 | 120 | 2 | 83 |
| 2 | 130 | 120 | 2 | 72 |
| 3 | 110 | 240 | 2 | 52 |
| 4 | 130 | 240 | 2 | 73 |
| 5 | 110 | 180 | 1 | 18 |
| 6 | 130 | 180 | 1 | 81 |
| 7 | 110 | 180 | 3 | 72 |
| 8 | 130 | 180 | 3 | 40 |
| 9 | 120 | 120 | 1 | 83 |
| 10 | 120 | 240 | 1 | 61 |
| 11 | 120 | 120 | 3 | 89 |
| 12 | 120 | 240 | 3 | 66 |
| 13 | 120 | 180 | 2 | 66 |
| 14 | 120 | 180 | 2 | 69 |
| 15 | 120 | 180 | 2 | 80 |
| 16 | 110 | 120 | 2 | 95 |
| 17 | 130 | 120 | 2 | 75 |
| 18 | 110 | 240 | 2 | 51 |
| 19 | 130 | 240 | 2 | 72 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | | | | |
|----|-----|-----|---|----|
| 20 | 110 | 180 | 1 | 18 |
| 21 | 130 | 180 | 1 | 79 |
| 22 | 110 | 180 | 3 | 71 |
| 23 | 130 | 180 | 3 | 38 |
| 24 | 120 | 120 | 1 | 88 |
| 25 | 120 | 240 | 1 | 64 |
| 26 | 120 | 120 | 3 | 87 |
| 27 | 120 | 240 | 3 | 67 |
| 28 | 120 | 180 | 2 | 82 |
| 29 | 120 | 180 | 2 | 78 |
| 30 | 120 | 180 | 2 | 73 |

จากตารางที่ 4.1 สามารถสร้างแบบจำลองการถดถอยได้จากการวิเคราะห์ผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมของค่าสัมประสิทธิ์ถดถอย (Coef) พร้อมกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SEcoef) ดังที่แสดงในตารางที่ 4.2 สำหรับแบบจำลองการถดถอยใน Coded units ระหว่างค่าปริมาณผลผลิตร้อยละของน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพกับตัวแปรแต่ละตัว ดังที่แสดงดังสมการที่ 4.1

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละผลผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ} = & 74.67 + 4.37X_1 - 10.38X_2 + 2.38X_3 - 13.27X_1^2 + 10.23X_2^2 \\ & - 9.27X_3^2 + 9.13X_1X_2 - 23.63X_1X_3 + 0.37X_2X_3 \end{aligned} \quad (4.1)$$

เมื่อ X_1 คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

X_2 คือ เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

X_3 คือ อัตราส่วน FAMES:EG ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

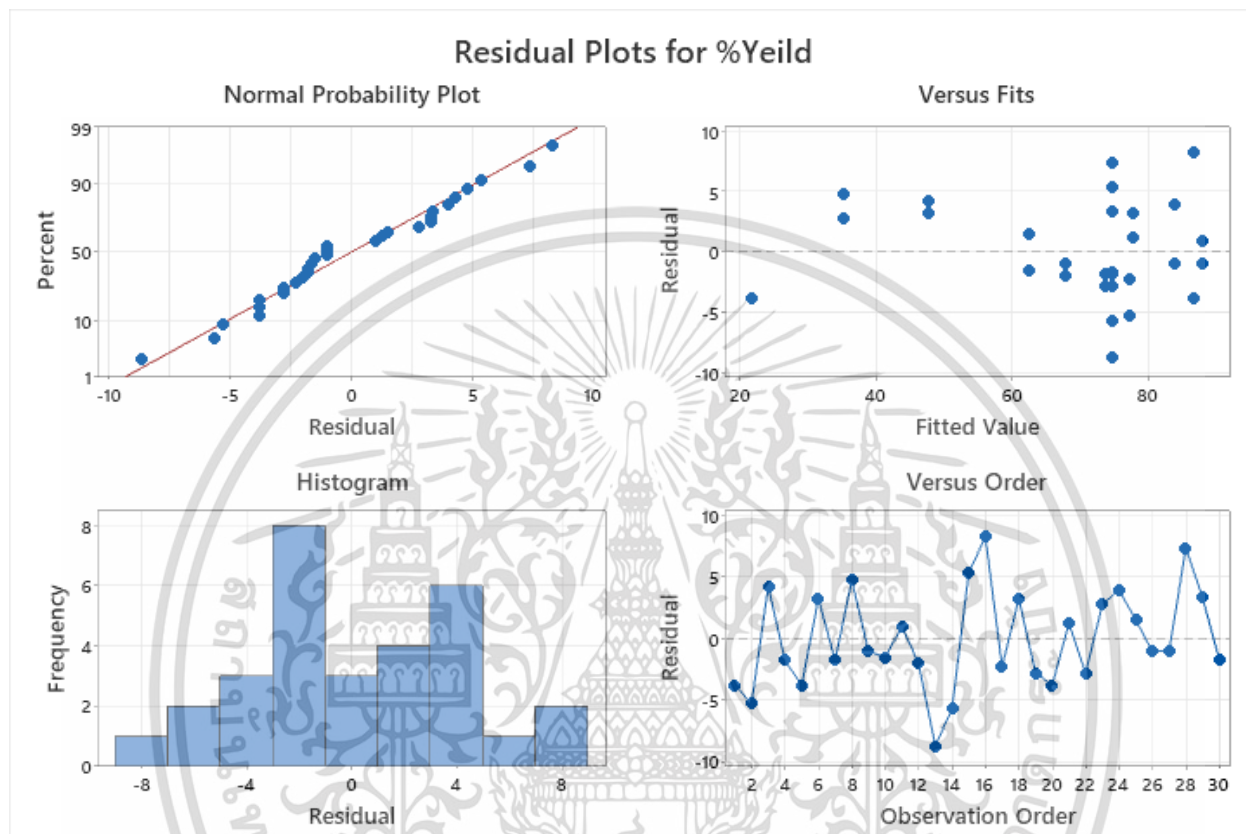
ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์การถดถอยของพื้นผิวตอบสนอง

| Source | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|-----------------------|--------|------------|-------------|---------|---------|
| Model | 9 | 10103.9 | 1122.65 | 48.10 | 0.000 |
| Linear | 3 | 2118.7 | 706.25 | 30.26 | 0.000 |
| Temp (°C) | 1 | 306.3 | 306.25 | 13.12 | 0.002 |
| Time (min) | 1 | 1722.2 | 1722.25 | 73.78 | 0.000 |
| Ratio | 1 | 90.3 | 90.25 | 3.87 | 0.063 |
| Square | 3 | 2852.7 | 950.91 | 40.74 | 0.000 |
| Temp (°C)*Temp (°C) | 1 | 1300.5 | 1300.54 | 55.72 | 0.000 |
| Time (min)*Time (min) | 1 | 772.7 | 772.70 | 33.10 | 0.000 |
| Ratio*Ratio | 1 | 634.7 | 634.70 | 27.19 | 0.000 |
| 2-Way Interaction | 3 | 5132.4 | 1710.79 | 73.29 | 0.000 |
| Temp (°C)*Time (min) | 1 | 666.1 | 666.13 | 28.54 | 0.000 |
| Temp (°C)*Ratio | 1 | 4465.1 | 4465.13 | 191.29 | 0.000 |
| Time (min)*Ratio | 1 | 1.1 | 1.12 | 0.05 | 0.828 |
| Error | 20 | 466.8 | 23.34 | | |
| Lack-of-Fit | 3 | 162.0 | 54.00 | 3.01 | 0.059 |
| Pure Error | 17 | 304.8 | 17.93 | | |
| Total | 29 | 10570.7 | | | |
| S | R-sq | R-sq (adj) | R-sq (pred) | | |
| 4.83132 | 95.58% | 93.60% | 90.85% | | |

ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R-Sq) เป็นค่าที่สามารถบ่งบอกร้อยละการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระในสมการถดถอย จากผลวิเคราะห์ Estimated regression coefficients for biolubricant ในตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าค่า R-Sq มีค่าเท่ากับ 95.58% หมายความว่าตัวแปรอิสระ (อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา เวลาในการทำปฏิกิริยา อัตราส่วน FAMES:EG ในการทำปฏิกิริยา) สามารถอธิบายความผันแปร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตาม (ผลผลิตของน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพที่ได้จากการทดลอง) ได้ร้อยละ 95.58 แสดงว่าแบบจำลองสามารถนำไปสร้างสมการทำนาย เพื่อหาค่าผลตอบแทนได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม



ภาพที่ 4.2 พล็อตค่าความคลาดเคลื่อน (Residual plot) ของร้อยละผลผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ

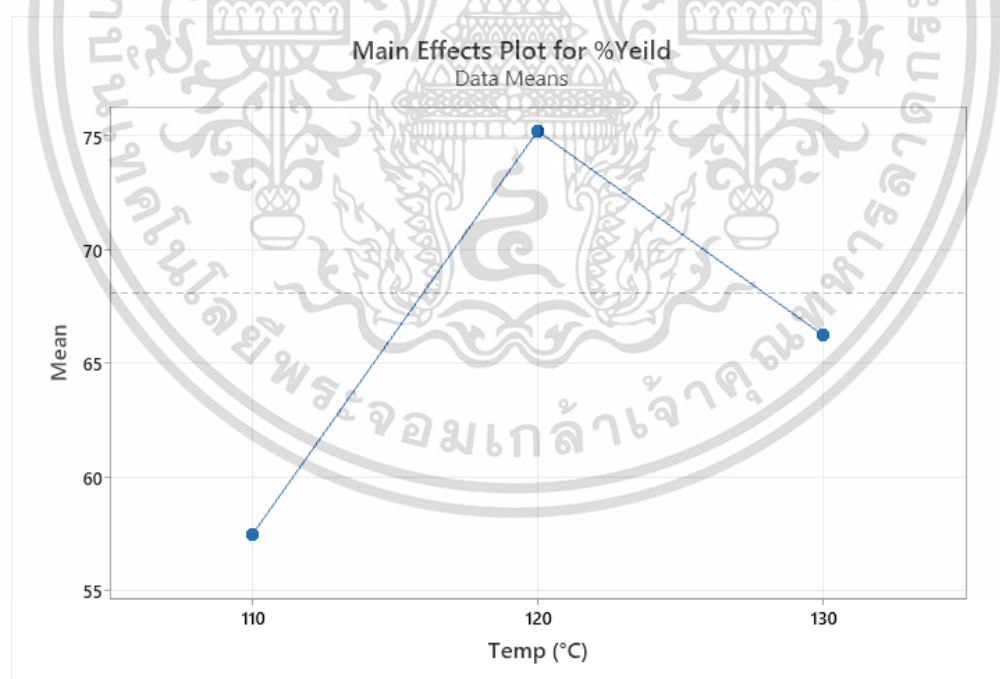
การวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของข้อมูลสามารถใช้วิธีการทางสถิติโดยการวิเคราะห์เศษตกค้าง (Residual Analysis) สามารถสรุปได้ว่า ตัวแบบการวิเคราะห์สมการถดถอยนั้นเหมาะสมหรือไม่ จากผลการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองโดยใช้การออกแบบการทดลอง Box-Behnken design

ดังภาพที่ 4.2 การพล็อตภาพความคลาดเคลื่อนเป็นแผนภาพกระจายตัวคู่กับค่าประมาณบนเส้นถดถอย โดยสังเกตในพล็อตของ Normal Probability Plot ถ้าหากใกล้เคียงกับเส้นตรงแสดงว่าความ คลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ เนื่องจากการกระจายตัวเป็นแนวเส้นตรงของร้อยละการผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพไม่แสดงสิ่งผิดปกติให้เห็น จึงสามารถสรุปได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ และความเป็นอิสระของค่าส่วนตกค้าง โดยใช้แผนภูมิการกระจาย พบว่าการกระจายตัวของผลผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพมีรูปแบบไม่แน่นอนแต่ค่อนข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางผลผลิต 60-80% จำนวนหนึ่ง แสดงถึงความเป็นอิสระของข้อมูล อีโตแกรมของค่าส่วนตกค้างไม่แสดงเป็นรูปประฆังคว่ำแสดงถึงการแจกแจงข้อมูลไม่เป็นเส้นตรง Versus Order แสดงถึงความเสถียรของความแปรปรวน โดยใช้แผนภูมิกระจายพบว่าร้อยละการผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพที่ได้จากการทดลองมีความสม่ำเสมอทั้งด้านบวกและด้านลบ แสดงว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน จากการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง พบว่าค่าส่วนตกค้างของข้อมูลที่ได้จากการทดลองเป็นไปตามสมมติฐานทั้ง 3 ข้อคือ (1) ส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ (2) ค่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน และ (3) ค่าความแปรปรวนมีเสถียรภาพ จึงสรุปได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองชุดนี้มีความถูกต้องและเหมาะสมสำหรับการนำไปวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจและวิเคราะห์ความแปรปรวน

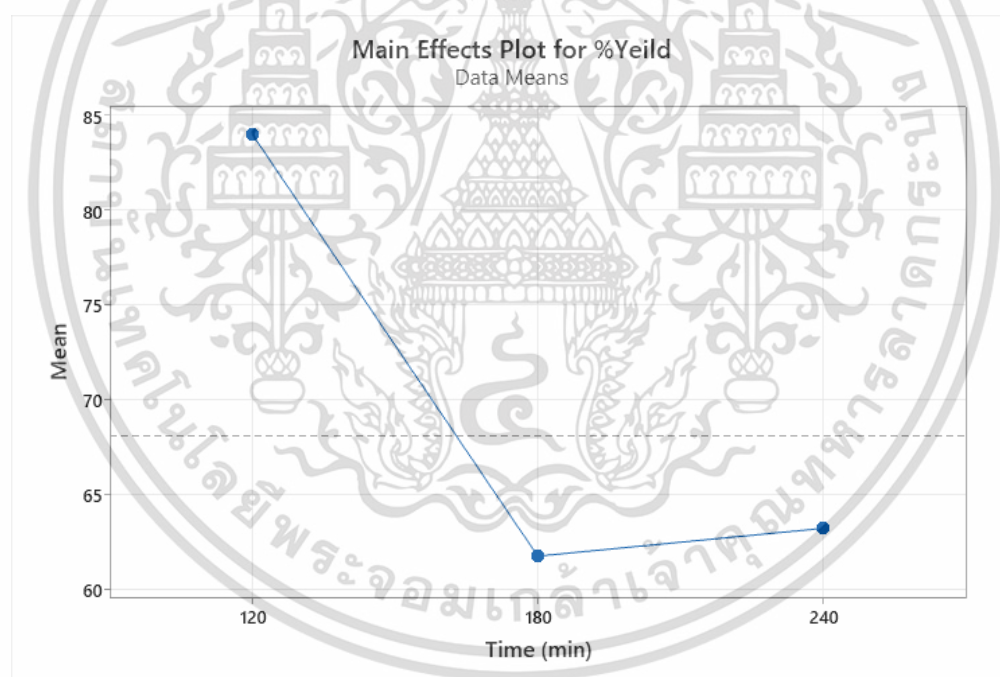
การกำหนดปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละของผลผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพที่มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 (5%) กล่าวคือ ผลผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพที่มีร้อยละต่อผลผลิต 95% อย่างมีนัยสำคัญ จึงมีความน่าเชื่อถือทางสถิติ ดังที่แสดงในตาราง 4.2 โดยปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ได้แก่ อุณหภูมิ เวลา และร้อยละโดยน้ำหนักไบโอดีเซลต่อเอทีเอสไกลคอล



ภาพที่ 4.3 พล็อตแสดงผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 4.3 อุณหภูมิที่แตกต่างกันส่งผลต่อผลผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพอย่างมีนัยสำคัญเมื่อพิจารณา ค่า P-Value ที่ 0.002 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิมีผลต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันอย่างมาก ภาพที่ 4.3 แสดงให้ผลของอุณหภูมิต่อค่าเฉลี่ยร้อยละของผลผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพที่อุณหภูมิ 110°C 120°C และ 130°C ตามลำดับ โดยการกระจายตัวของข้อมูลมีความถี่สูงสุดที่อุณหภูมิ 120°C โดยได้ค่าเฉลี่ยร้อยละของผลผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพเท่ากับ 75.21 ที่อุณหภูมิ 130°C ได้ค่าเฉลี่ยร้อยละของผลผลิตเท่ากับ 66.25 และ ณ อุณหภูมิ 110°C ได้ค่าเฉลี่ยร้อยละผลผลิตเท่ากับ 57.50 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากร้อยละผลผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพตามตารางที่ 4.1 พบว่าที่อุณหภูมิ 110°C ให้ผลผลิตสูงที่สุดโดยมีค่าเท่ากับ 95% จึงอธิบายได้ว่าอุณหภูมิมิผลต่อร้อยละผลผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ เนื่องจากความร้อนช่วยเร่งให้เกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน เพื่อเปลี่ยนหมู่เอสเทอร์ในกรดไขมันของเมทิลเอสเทอร์ (FAMES) กับเอทีลีนไกลคอล (EG) ในการแตกพันธะของเมทิลในโซ่ของกรดไขมันและแทนที่ด้วย CH₂ ของเอทีลีนไกลคอล

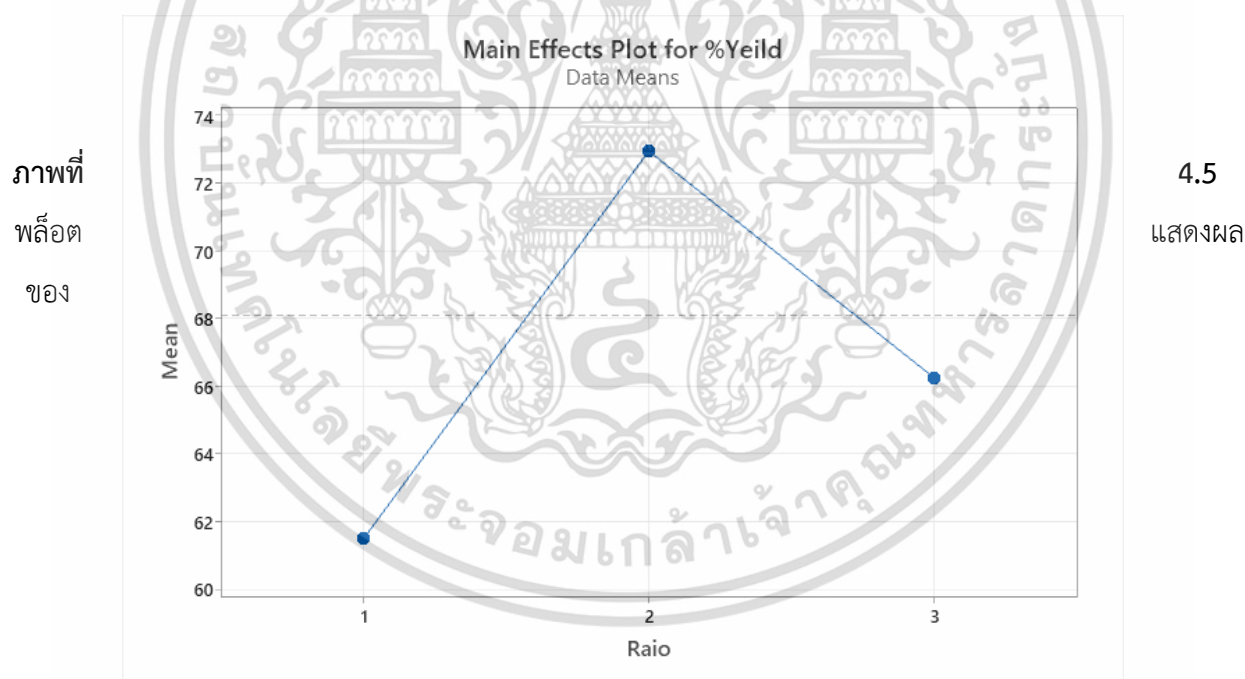


ภาพที่ 4.4 พล็อตแสดงผลของเวลาต่อร้อยละผลผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิทธิพลของเวลาส่งผลต่อร้อยละผลผลิตของน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ โดยเวลาของการทำปฏิกิริยาแปรผันระหว่าง 120 ถึง 240 นาที จากค่า P-Value ที่ 0.000 แสดงให้เห็นว่าเวลานั้นมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากปฏิกิริยาดังกล่าวเป็นปฏิกิริยาที่สามารถผันกลับได้เมื่อเวลาผ่านไปทำให้ผลผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพที่ควรได้จากการการทำปฏิกิริยา เกิดการผันกลับเป็นไบโอดีเซล (FAMES) ส่งผลให้ร้อยละของผลผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพมีอัตราการเกิดได้น้อยลง ดังแสดงในภาพที่ 4.4 สังเกตได้ว่า ที่เวลา 120 นาที ให้ร้อยละของผลผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพเฉลี่ยสูงที่สุด ได้ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 84 โดยร้อยละผลผลิตที่ได้มากที่สุดอยู่ที่ 95% (ตารางที่ 4.1) ณ สภาวะเดียวกันที่อุณหภูมิ 110°C

เมื่อให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไปจนครบ 180 และ 240 นาที พบว่าร้อยละผลผลิตที่เกิดขึ้นมีค่าเฉลี่ยร้อยละผลผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยร้อยละผลผลิตมากที่สุดที่วัดได้ ณ เวลา 240 นาที เท่ากับ 51% (ตารางที่ 4.1) จึงสรุปได้ว่าเวลาที่มีผลอย่างมากต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ



อัตราส่วน FAMES : EG ต่อร้อยละผลผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ

ภาพที่ 4.5 แสดงถึงผลของอัตราส่วนของไบโอดีเซลต่อเอทิลีนไกลคอลต่อร้อยละผลผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

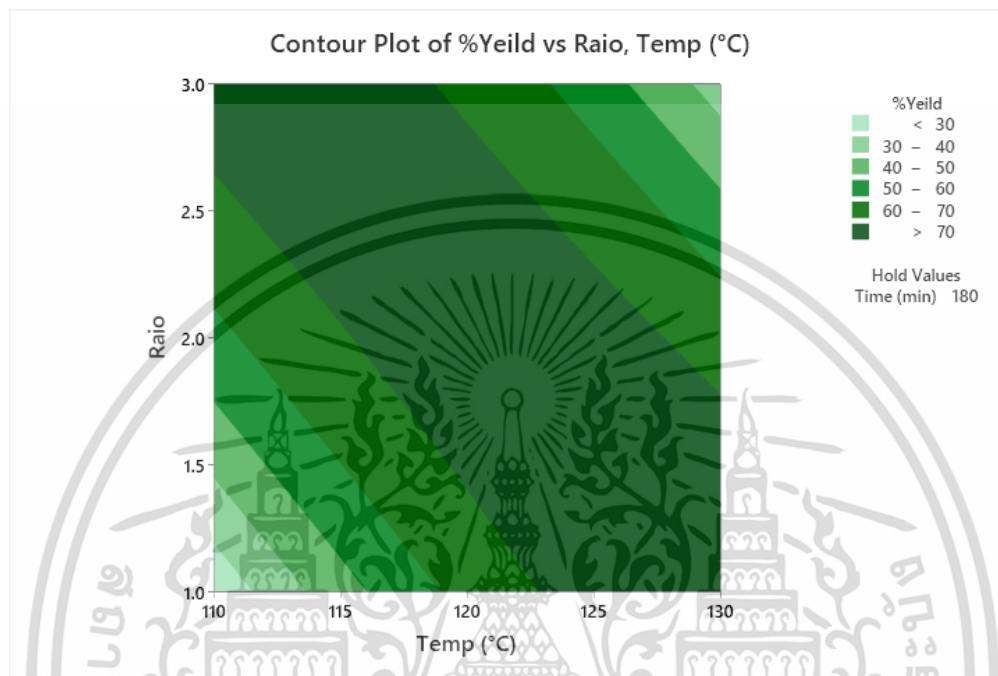
น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพซึ่งค่า P-Value เท่ากับ 0.063 พบว่าจากการทดลองเปลี่ยนโมลาร์ของของไบโอดีเซล/เอทิลีนไกลคอล โดยใช้ K_2CO_3 เป็นเร่งปฏิกิริยา ผลผลิตของน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มโดยผลลัพธ์ที่ดีที่สุด คือ 95% (ตารางที่ 4.1) โดยอัตราส่วนที่ใช้คือ 2:1 ทั้งนี้เมื่อทำการปรับค่าอัตราส่วนโมลาร์เพิ่มขึ้นเป็น 3:1 ผลปรากฏว่าผลผลิตที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มลดลง โดยค่าที่ดีที่สุดคือ 89% ไม่ได้ส่งผลให้ปริมาณของผลผลิตเพิ่มขึ้นแต่อย่างใด ดังนั้นผลผลิตที่ได้จึงลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากแอลกอฮอล์ที่มากเกินไปช่วยเสริมให้ปฏิกิริยาเคมีขับไปทางซ้าย ส่งผลให้ผลผลิตเอสเทอร์ของปฏิกิริยาทางขาลดน้อยลง ด้วยข้อสังเกตนี้จึงสรุปได้ว่า อัตราส่วนของ FAMES/แอลกอฮอล์ เป็นสิ่งที่ควรคำนึงถึงอย่างมากเพื่อให้ได้ปริมาณผลผลิตที่ดีที่สุดควรปรับโมลาร์ของปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพนี้ให้มีความเหมาะสม (George...Et al, 2009)



ภาพที่ 4.6 Contour Plot อิทธิพลร่วมของอุณหภูมิและเวลาต่อร้อยละผลผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ

ผลของอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิและเวลาต่อร้อยละของผลผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ ดังแสดงในภาพที่ 4.6 ซึ่งค่าแปรผันของอุณหภูมิอยู่ในช่วง 110 – 130°C และกำหนดช่วงเวลาอยู่ระหว่าง 120 – 240 นาที จากการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในช่วงปัจจัยที่ศึกษา คือ ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 110°C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 120 นาที ซึ่งเมื่อให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไป ณ อุณหภูมิเดียวกันพบว่าอัตราการเอกลสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

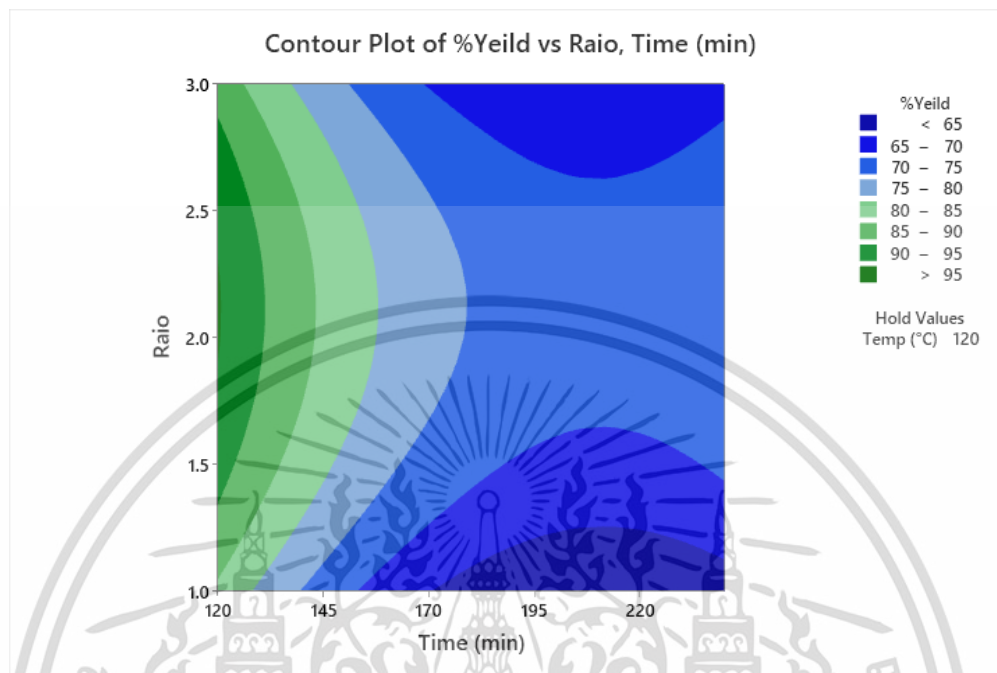
เกิดผลผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพมีแนวโน้มลดลงจากความเข้มข้นของกราฟ เนื่องจากอุณหภูมิช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาให้เกิดเร็วขึ้นจนถึงช่วงที่ปฏิกิริยาเกิดการเปลี่ยนแปลงช้า ส่งผลให้ได้ผลลัพท์น้อยลงเมื่อเวลาแปรผันไป



ภาพที่ 4.7 Contour Plot อิทธิพลร่วมของอุณหภูมิและอัตราส่วน FAME:EG ต่อร้อยละผลผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ

ผลของอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิและอัตราส่วนของไบโอดีเซล : อัตราส่วนของเอทิลีนไกลคอล ดังแสดงในภาพที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าค่าแปรผันของอุณหภูมิที่ 110 - 130°C มีผลต่อโมลาร์ที่เปลี่ยนไปของไบโอดีเซล : แอลกอฮอล์เป็นอย่างมาก เนื่องจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปนี้เป็นตัวเร่งให้การเกิดปฏิกิริยาเกิดได้เร็วยิ่งขึ้น โดยจากภาพที่ 4.7 สังเกตได้ว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความเข้มข้นของกราฟมีความเข้มข้นตามลำดับตั้งแต่ 100°C ไปจนถึง 130°C และอัตราส่วนของ FAME:EG ก็ไปในทิศทางเดียวกัน เมื่อพิจารณาอิทธิพลร่วมของตัวแปรทั้งสองตัวสามารถสรุปได้ว่า การใช้แอลกอฮอล์ที่มากเกินไปส่งผลต่อการเกิดสารผลิตภัณฑ์ กล่าวคือทำให้ปฏิกิริยามีแนวโน้มไปทางขวามากกว่าควรเตรียมอัตราส่วนของน้ำมันที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ผลผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพมากที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 4.7

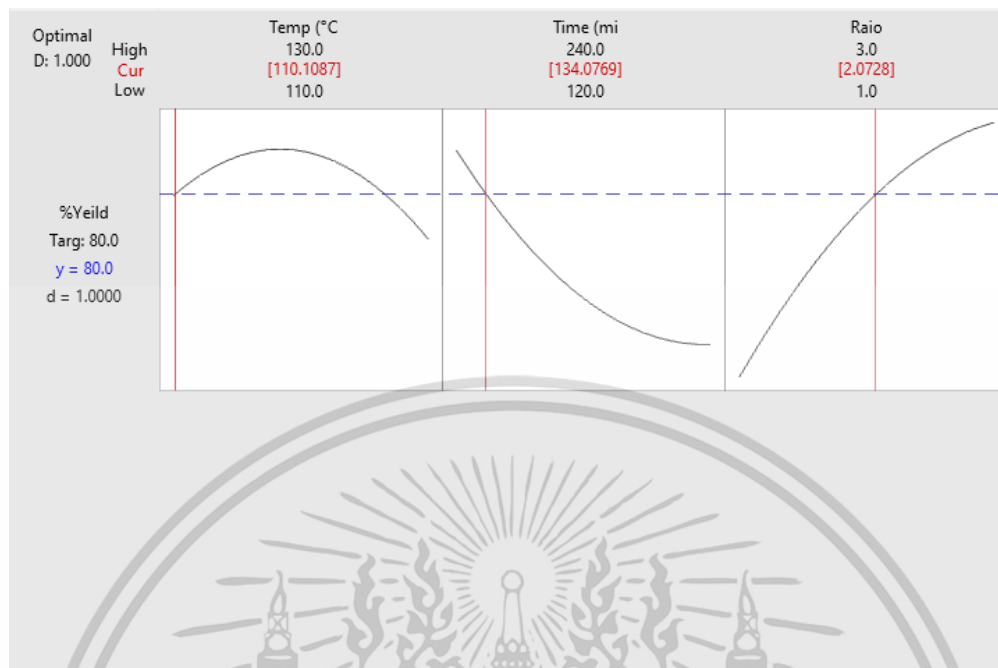
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.8 Contour Plot อิทธิพลรวมของเวลาและอัตราส่วน FAME : EG ต่อร้อยละผลผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ

จากภาพที่ 4.8 พบว่าอิทธิพลรวมของเวลาที่เปลี่ยนแปลงโดยมีค่าการแปรผกผันอยู่ที่ 120 – 240 นาที และอัตราส่วนของไบโอดีเซลต่อแอลกอฮอล์ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปผลผลิตน้ำมันหล่อชีวภาพมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่เมื่อเพิ่มอัตราส่วน FAMEs:EG ความเข้มข้นของผลผลิตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่อัตราส่วน 2:1 และเริ่มลดลงเมื่ออัตราส่วนดังกล่าวมีค่าเข้าใกล้ 3 ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมในการทดลองนี้คือ ที่เวลา 120 นาที โดยมีอัตราส่วนของไบโอดีเซล : เอทิลีนไกลคอลเท่ากับ 2:1 กล่าวคือเมื่อปล่อยให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไปตามค่าแปรผกผันของเวลาที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ผลผลิตที่ได้ลดลงอย่างเห็นได้ชัด สรุปได้ว่าการเพิ่มเวลาจากสภาวะที่กำหนดในการทำปฏิกิริยาไม่ได้ให้ผลลัพธ์ของผลผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพเพิ่มขึ้นแต่อย่างใด และการใช้อัตราส่วนที่มากเกินไปยังทำให้สูญเสียค่าใช้จ่ายไปเกินจำเป็นอีกด้วยแต่กลับให้ผลผลิตที่ลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.9 การวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพจากน้ำมันไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

การหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ได้ร้อยละผลผลิตของน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพมากที่สุดโดยใช้ฟังก์ชัน response optimizer ในโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่ใช้หาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย และใช้วัดความพึงพอใจโดยรวมของผล (composite desirability: D) ซึ่งค่าความพึงพอใจของผลตอบมีค่าอยู่ระหว่าง 0-1 ถ้า D มีค่าเท่ากับ 1 หมายถึง ผลตอบนั้นได้รับความพึงพอใจอย่างสมบูรณ์ จากการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ฟังก์ชัน respond optimizer ดังแสดงในภาพที่ 4.9 คำนวณสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพจากน้ำมันไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันคือ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 110 °C เวลาทำปฏิกิริยา 135 นาที และอัตราส่วนโมลาร์ของสารตั้งต้น 2:1 โดยคาดว่าจะได้น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพร้อยละ 80 โดยทำการทดลองเพื่อพิสูจน์ตามปัจจัยข้างต้นทั้งหมด 3 ครั้ง ดังตารางที่ 4.3 ผลผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพร้อยละ 85 75 และ 80 ตามลำดับ โดยคิดเป็นร้อยละผลผลิต 80 โดยเฉลี่ย โดยมีค่าใกล้เคียงค่าที่ทำนายในการหาสภาวะที่เหมาะสม ที่ร้อยละ 80 จึงถือว่าเป็นการทำนายของ respond optimizer จากนั้นจึงนำน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพที่ได้ไปวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพต่อไป

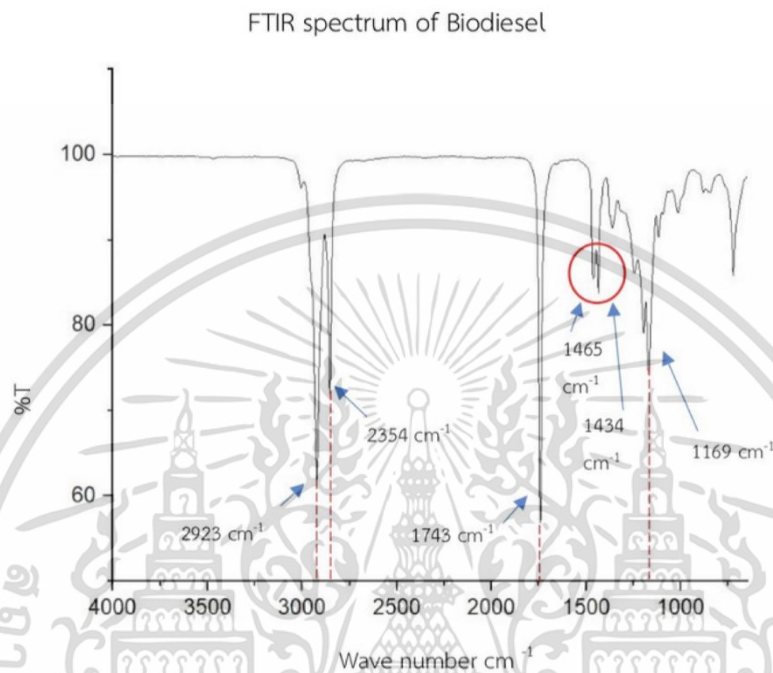
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ร้อยละผลผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพตามสภาวะจากสภาวะที่เหมาะสมที่สุด

| ครั้ง | อุณหภูมิ (°C) | เวลา (นาที) | อัตราส่วน FAME:EG | ร้อยละผลผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ |
|--|---------------|-------------|----------------------|----------------------------------|
| 1 | 110 | 135 | 2 | 85 |
| 2 | 110 | 135 | 2 | 75 |
| 3 | 110 | 135 | 2 | 80 |
| คำทำนายจากการหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพจากน้ำมันไบโอดีเซลโดยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน | | | | 80 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติเคมีกายภาพของน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ

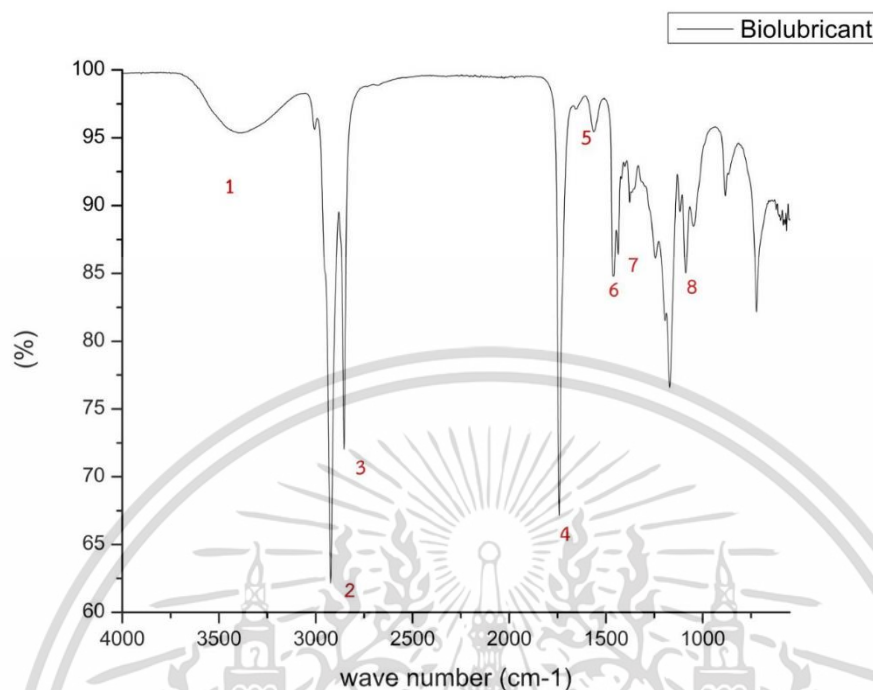


ภาพที่ 4.10 FTIR spectrum ของไบโอดีเซล

ที่มา : (ศรัณย์ และคณะ, 2565)

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของไบโอดีเซลจากสเปกตรัม FTIR ของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตจาก WCO แสดงไว้ในภาพที่ 4.9 โดยจะปรากฏพีคที่ 2923 และ 2854 cm^{-1} บ่งบอกถึงการมีอยู่ของพันธะ C-H (แบบยืด) ของหมู่เมทิล (CH_3) และหมู่เมทิลีน (CH_2) พีคที่ 1743 cm^{-1} บ่งบอกถึงการมีอยู่ของหมู่ C=O (แบบยืด) ของเอสเทอร์ พีคที่ 1169 cm^{-1} บ่งบอกถึงการมีอยู่ของพันธะ C-O (แบบยืด) ของหมู่เอสเทอร์ พีคที่ 1465 และ 1434 cm^{-1} บ่งบอกถึงการมีอยู่ของพันธะ C-H (แบบงอ) ของหมู่เมทิล (CH_3) และหมู่เมทิลีน (CH_2) สามารถบ่งบอกได้ว่ามีหมู่เมทิลเกิดขึ้น ซึ่งหมู่เมทิลนี้ ได้มาจากการทำปฏิกิริยากับเมทานอล เกิดผลผลิตเป็นเมทิลเอสเทอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.11 FT-IR spectrum ของน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ

จากภาพที่ 4.9 แสดงแถบการดูดกลืนแสงของน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ จาก FT-IR spectrum เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของสารตัวอย่าง ผลลัพธ์ที่ได้คือ FT-IR spectrum ของน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพปรากฏลักษณะเฉพาะหลายตำแหน่งกราฟแสดงแถบซึ่งมีความเข้มสองแถบ ที่ 2950 cm^{-1} (peak 2) และ 2850 cm^{-1} (peak 3) เนื่องจากการยืดตัวของพันธะ C-H (แบบยืด) ในกลุ่มของเมทิลีน (CH_2) และเมทิล (CH_3) (peak 4) บ่งชี้ถึงการยืดของพันธะในกลุ่มเอสเทอร์คาร์บอนิลของน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพที่ผลิตได้ที่ 1742 cm^{-1} ซึ่งยืนยันการมีอยู่ของเอสเทอร์ได้อย่างชัดเจน ที่ (peak 5) บ่งบอกถึงคาร์บอนกลุ่มโอเลฟินิกกับพันธะคาร์บอนเนื่องจากไม่มีปฏิกิริยาที่เป็นการจัดพันธะคู่ในสายโซ่หลักของไฮโดรคาร์บอน ที่ 1575 cm^{-1} และ 1543 cm^{-1} บ่งชี้การยืดหดของพันธะตามแกน โดยเกิดทั้งแบบสมมาตร (symmetric stretching) และแบบยืดไม่สมมาตร (antisymmetric stretching) ของ C-O ที่ 1166 cm^{-1} (peak 8) และที่ 3443 cm^{-1} (peak 1) เป็นการแสดงถึงการยืดตัวของไฮดรอกซิล O-H ซึ่งบ่งบอกถึงการรวมกันของเอทิลีนไกลคอลและไบโอดีเซลของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันได้เป็นน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงสมบัติทางเคมีและกายภาพของน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพเปรียบเทียบกับมาตรฐานน้ำมันหล่อลื่น

| | Viscosity @40°C, cST | Viscosity @100°C, cST | Viscosity Index | Flash Point,°C | Total acid number, mg KOH/g | Oxidation Stability,min |
|---|----------------------------|-----------------------------|--------------------|-------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| Product | 12.22 | 3.32 | 151.11 | 125 | 1.65 | 9 |
| Biolubricant | | | | | | |
| มาตรฐาน น้ำมันหล่อลื่น 150SN | 28.0 - 33.0 | - | 100 | 204 | >0.05 | - |
| มาตรฐาน น้ำมันหล่อลื่นกรม ธุรกิจพลังงาน | - | 21.9 - 26.1 | >92 | 204 | - | - |

4.3.1 ค่าความหนืดที่ 40 °C และ 100°C

ความหนืดของน้ำมันมีความสำคัญในการใช้งานมากเพราะเป็นเครื่องบ่งบอกความต้านทานการไหลของน้ำมันและบ่งบอกถึงความสามารถในการหล่อลื่น ไม่ควรมีความหนืดมากเกินไปหรือน้อยเกินไป เพราะจะทำให้เกิดการเสียดสีของโลหะได้ง่ายและสึกหรอได้เร็ว จากตารางที่ 4.4 ค่าความหนืดที่ตรวจวัดได้จาก Viscometer ด้วยวิธี ASTM D445 ณ อุณหภูมิ 40°C อยู่ที่ 12.22 cSt และ ณ อุณหภูมิ 100°C อยู่ที่ 3.32 cSt ซึ่งถือว่ายังมีค่าความหนืดน้อยเกินไปหากเทียบกับมาตรฐานน้ำมันหล่อลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 ค่าดัชนีความหนืด (VI Index)

ถ้าน้ำมันหล่อลื่นมีความหนืดเปลี่ยนแปลงน้อยเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงมาก แสดงว่าน้ำมันหล่อลื่นนั้นมีค่า VI สูง ทำให้การหล่อลื่นมีประสิทธิภาพสูง การสึกหรอลดลง แต่ถ้าความหนืดของน้ำมันเปลี่ยนแปลงมากเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยแสดงว่าน้ำมันนั้นมีค่า VI ต่ำ การหล่อลื่นมีประสิทธิภาพต่ำด้วย โดยจากตารางที่ 4.4 ค่าดัชนีความหนืดที่คำนวณได้ด้วยวิธี ASTM D2270 มีค่าเท่ากับ 151.11 ซึ่งมากกว่ามาตรฐาน บ่งบอกได้ว่าผลิตภัณฑ์มีค่า VI สูง ส่งผลต่อมีประสิทธิภาพในการหล่อลื่นที่ดี

4.3.3 จุดวาบไฟ (Flash Point)

จุดวาบไฟ จะบ่งบอกความปลอดภัยในการเก็บรักษาและการขนถ่าย เพื่อป้องกันการเกิดอัคคีภัยและจุดติดไฟ ซึ่งน้ำมันหล่อลื่นที่มีอุณหภูมิของจุดวาบไฟสูงจะมีประสิทธิภาพในการใช้งานในสถานะที่มีอุณหภูมิสูงได้ดีกว่าน้ำมันหล่อลื่นที่มีจุดวาบไฟต่ำ โดยจากตารางที่ 4.4 จุดวาบไฟของผลิตภัณฑ์ที่ใช้เครื่องมือ Flash point tester ด้วยวิธี ASTM D92 มีค่าเท่ากับ 125 ซึ่งยังถือว่าต่ำกว่ามาตรฐานน้ำมันหล่อลื่น จะมีประสิทธิภาพในการใช้งานต่ำ

4.3.4 ค่าความเป็นกรด (Total acid number)

ปริมาณกรดของน้ำมันเป็นข้อมูลที่ช่วยในการคาดคะเนระดับความรุนแรงของการเกิดออกซิเดชันในน้ำมัน ค่าความเป็นกรดจะส่งผลต่อชิ้นส่วนของเครื่องจักรที่เป็นโลหะเกิดการกัดกร่อนได้และยังสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงการเสื่อมคุณภาพของน้ำมันหล่อลื่นในระหว่างการใช้งานได้อีกด้วย จากตารางที่ 4.4 ค่าความเป็นกรดที่วัดได้จากการ Titrator ด้วยวิธี ASTM D974 ได้ค่าความเป็นกรด 1.65 mg KOH/g ซึ่งถือว่าเยอะกว่าค่าความเป็นกรดของมาตรฐานน้ำมันหล่อลื่น ที่ควรมีไม่เกิน 0.05-0.1 mg KOH/g

4.3.5 การต้านทานการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation Stability)

ความคงตัวต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเป็นค่าที่บ่งชี้ถึงความเสถียรของน้ำมันต่อการถูกออกซิไดซ์ภายใต้สภาวะที่เร่งให้มีการออกซิไดซ์เกิดขึ้น หากน้ำมันหล่อลื่นทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ จะเกิดสารประเภทกรด และคราบยางเหนียวปฏิกิริยานี้จะเกิดได้เร็วถ้าอุณหภูมิสูง น้ำมันหล่อลื่นจะเสื่อมสภาพ โดยจากตารางที่ 4.4 การต้านทานการเกิดออกซิเดชันของผลิตภัณฑ์ที่ใช้เครื่องมือ PRVOT tester ด้วยวิธี ASTM D2272 มีค่าเท่ากับ 9 นาที ซึ่งถือว่าน้อยมากเกินไป สำหรับค่าที่เหมาะสมควรมากกว่า 300 นาทีขึ้นไป แสดงว่าผลิตภัณฑ์มีโอกาสเกิดออกซิไดซ์เร็วมาก ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

การหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพจากน้ำมันปรุงอาหารที่ใช้แล้วด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันโดยกำหนด 3 ปัจจัยด้วยการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken design คือ 1. อุณหภูมิระหว่างการทำปฏิกิริยาที่ 110-130 องศาเซลเซียส 2. เวลาในการทำปฏิกิริยาในช่วง 120-240 นาที 3. อัตราส่วนระหว่างไบโอดีเซลต่อเอทิลีนไกลคอล 1:1-3:1 โดยทำการทดลองทั้งหมด 30 ครั้ง เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ response optimizer เพื่อให้ได้ร้อยละของผลผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพมากที่สุดคือที่ อุณหภูมิ 110°C เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 135 นาที อัตราส่วนของน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพต่อเอทิลีนไกลคอล 2:1 โดยคาดว่าจะได้ผลผลิตร้อยละ 80 จากนั้นนำสภาวะที่ได้มาทำซ้ำ 3 ครั้งโดยได้ผลผลิตร้อยละ 85, 75 และ 80 ตามลำดับ ร้อยละผลผลิตเฉลี่ยอยู่ที่ 80 ซึ่งใกล้เคียงกับ response optimizer ที่ได้คำนวณไว้จึงถือว่าเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพจากน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วนั้นประสบความสำเร็จ จากนั้นนำน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพที่ได้จากสภาวะข้างต้นไปวิเคราะห์ FT-IR spectrum เพื่อตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ พบพีคที่ 3443 cm^{-1} เป็นการแสดงถึงการยืดตัวของไฮดรอกซิล O-H ซึ่งบ่งบอกถึงการรวมกันของเอทิลีนไกลคอลและไบโอดีเซลได้เป็นน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ ความหนืดวัดได้ที่ 12.22 cSt ค่าดัชนีความหนืด 151.11 เกิดจุดวาบไฟที่ 125°C ค่าการต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่ 9 นาที ซึ่งใกล้เคียงกับมาตรฐานน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ แต่ที่ยังไม่ตรงกับมาตรฐาน อาจเป็นเพราะเอทิลีนไกลคอลเข้าทำปฏิกิริยากับไบโอดีเซลได้ไม่เต็มที่ เนื่องจากการควบคุมอุณหภูมิระหว่างการทำปฏิกิริยามีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย ไม่คงที่ตลอดเวลา โดยน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพที่ดีจะต้องมีคุณสมบัติที่กล่าวมา ตรงกับมาตรฐานน้ำมันหล่อลื่น ซึ่งจะส่งผลต่อการใช้งานของเครื่องจักรที่ใช้ และคุณภาพ รวมถึงอายุการใช้งานของน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ หากสามารถปรับปรุงคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพได้ จะได้น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและยังสามารถใช้แทนน้ำมันหล่อลื่นจากปิโตรเลียมในโรงงานอุตสาหกรรมอาหารได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ศึกษาเสถียรภาพทางความร้อน(TGA) และจุดไหลเท(Pour point) ของน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ

5.2.2 ศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่นๆ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพจากน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

5.2.3 ปรับปรุงคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพให้ดีขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- รัฐภากรณ์ อินเกิด, ชูรัตน์ ธารารักษ์, จุฑาภรณ์ ชนะถาวร และ ณัฐวุฒิ คุชฎี. 2559.การสังเคราะห์
น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพจากน้ำมันพืชด้วยกระบวนการทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน. ในการประชุมวิชาการ
เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่12. จังหวัด พิษณุโลก:มหาวิทยาลัยนเรศวร ร่วมกับ
มหาวิทยาลัยแม่โจ้
- รัฐภากรณ์ อินเกิด, ชูรัตน์ ธารารักษ์, จุฑาภรณ์ ชนะถาวร และ ณัฐวุฒิ คุชฎี. 2560.การศึกษาเปรียบเทียบ
คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นสังเคราะห์จากน้ำมันพืช ด้วยกระบวนการทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้
โพสโธตริกแอลกอฮอล์ในการทำปฏิกิริยา. ในการประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย
ครั้งที่13. จังหวัด เชียงใหม่:มหาวิทยาลัยแม่โจ้
- ศรัณย์ ผลโพธิ์,สุทธิรัตน์ วิสัยใส และ สัญชัย ป้อมอุ่นเรือน. 2565.การหาสภาวะที่เหมาะสมในการ
สังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันที่ผ่านการทำอาหารโดยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน. กรุงเทพฯ:
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- Anastopoulos, G., Zannikou, Y., Stournas, S. and Kalligeros, K. 2009.Transesterification of
Vegetable Oils with Ethanol and Characterization of the Key.Fuel Properties of Ethyl
Esters. Energies 2009. ISSN 1996-1073
- Amenaghawon, A.N., Obahiagbon, K., Iselele, V. and Usman, F.2022. Optimized biodiesel
production from waste cooking oil using a functionalized bio-based heterogeneous
catalyst. Cleaner Engineering and Technology 8 100501.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Angulo, B., Fraile, J.M., Gil, L. and Herrerías, C.L. 2018. Bio-lubricants production from fish oil residue by transesterification with trimethylolpropane, *Journal of Cleaner Production*. 10.1016/j.jclepro.2018.07.260
- Attia, N.K., El-Mekkawi, S.A., Elardy, O.A. and Abdelkader, E.A. 2020. Chemical and rheological of produced biolubricants from different vegetable oils. *Fuel* 271 (2020) 117578.
- Encinar, J.M., Nogales-Delgado, S. and Alvez-Medina, C.M. (2018). High oleic safflower biolubricant through double transesterification with methanol and pentaerythritol: Production, characterization, and antioxidant addition. *Arabian Journal of Chemistry* (2022) 15,103796.
- Khodadadi, M.R., Malpartida, I., Tsang, C.W., Lin, C.S.K. and Len, C. 2020. Recent advances on the catalytic conversion of waste cooking oil, *Molecular Catalysis* 494 (2020) 111128.
- Monika A. Jedrzejczyk, Bosch, S.D.B., Aelst, J.V., Aelst, K.V., Panos D., Kouris, Moalin, M., Haenen, G.R.M.M., Boot, M.D. and Hensen, E.J.M., Lagrain, B., Sels, B.F. and Bernaerts, K.V. 2021. Lignin-Based Additives for Improved Thermo-Oxidative Stability of Biolubricants. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*.
- Nor, N.M., Salih, N. and Salimon, J. 2022. Optimization and lubrication properties of Malaysian crude palm oil fatty acids based neopentyl glycol diester green biolubricant. *Renewable Energy* 200 (2022) 942–956.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Sun, G., Li, Y., Cai, Z., Teng, Y., Wang, Y. and Reaney, M.J.T. 2017. K₂CO₃-loaded hydrotalcite: A promising heterogeneous solid base catalyst for biolubricant base oil production from waste cooking oils. *Applied Catalysis B, Environmental*.
- Yosief, H.O., Sarker, M.I., Bantchev, G.B., Dunn, R.O. and Steven C. Cermak. 2022. Chemical Modification of Beef Tallow for Lubricant Application. *I&EC research Industrial & Engineering Chemistry Research*.
- Zainala, N.A., Zulkifli N.W.M., Gulzarb, M. and Masjukia, H.H. 2018. A review on the chemistry, production, and technological potential of biobased lubricants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82 (2018) 80-102.
- Zhang, J., Cao, D., Wang, S., Feng, X., Zhu, J., Lu, X. and Liwen Mu. 2022. Valorization of industrial lignin as lubricating additives by C-C Bond Cleavage and doping heteroelement-rich groups. *Biomass and Bioenergy* 161 (2022) 106470

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการคำนวณและการวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ

ก.1 การคำนวณปริมาณร้อยละผลผลิตของน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ (%yield)

การคำนวณปริมาณร้อยละผลผลิตของน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ (%yield) หาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{ร้อยละผลผลิตของน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ (\%)} = \frac{\text{ปริมาตรของน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ (มล.)}}{\text{ปริมาตรของน้ำมันไบโอดีเซล (มล.)}} \times 100$$

ตัวอย่างการคำนวณ : วัดปริมาณของน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพที่ได้รับ = 80 มล.

ปริมาณของไบโอดีเซลที่ใช้เป็นสารตั้งต้น = 100 มล.

$$\text{จะได้ว่าร้อยละผลผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ} = \frac{80}{100} \times 100 = 80\%$$

ก.2 การศึกษาและทดลองสังเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพทั้งหมด 7 ครั้ง

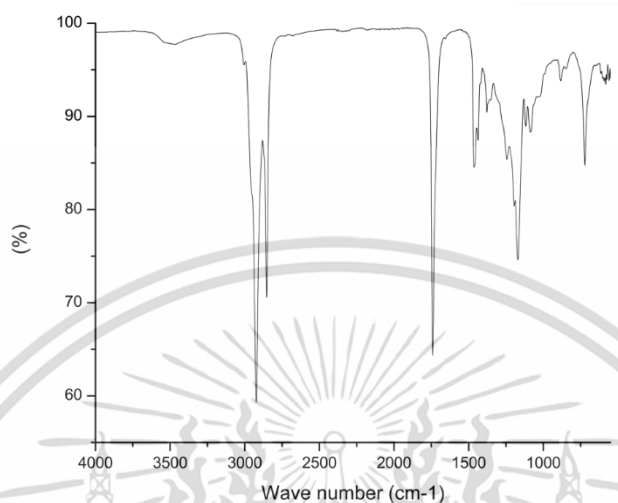
1. การตรวจวัดความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ
2. การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน FTIR ของน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ

ตารางที่ ก.1 การทดลองสังเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ และการตรวจวัดความหนืด

| ครั้งที่ | อุณหภูมิ (°C) | เวลา (นาที) | อัตราส่วน FAME:EG | K ₂ CO ₃ (wt) | Viscosity |
|----------|---------------|-------------|-------------------|-------------------------------------|-----------|
| 1 | 120 | 180 | 1:1 | 1.5 | wax |
| 2 | 120 | 180 | 1:1 | 1.5 | wax |
| 3 | 120 | 180 | 1:1 | 1.5 | wax |
| 4 | 120 | 180 | 1:1.5 | 1.5 | 7.43 |
| 5 | 120 | 180 | 2:1 | 1.5 | 7.41 |
| 6 | 120 | 180 | 2:1 | 1.5 | 8.51 |
| 7 | 120 | 180 | 3:1 | 1.5 | wax |

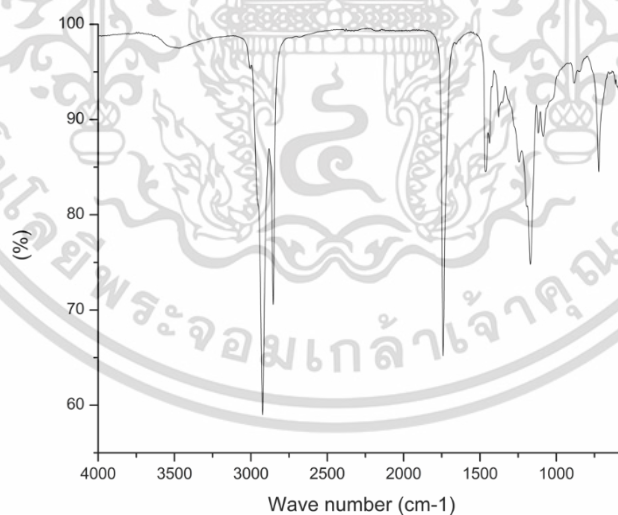
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน



ภาพที่ ก.1 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน FTIR

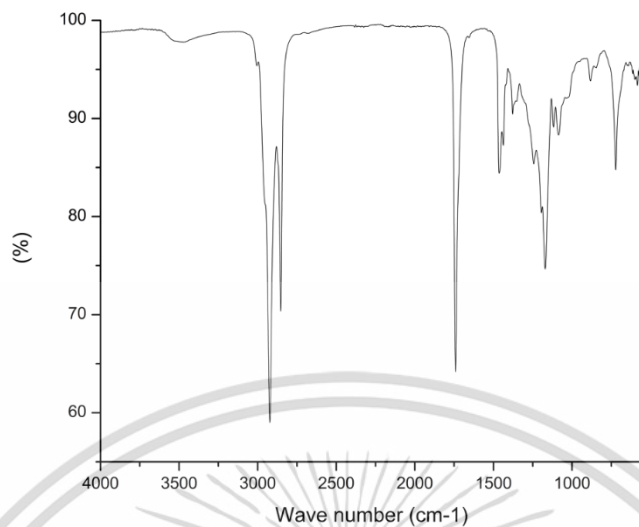
การสังเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพครั้งที่ 1 ที่ อุณหภูมิ 120°C, เวลา 180 นาที และอัตราส่วน FAME:EG 1:1



ภาพที่ ก.2 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน FTIR

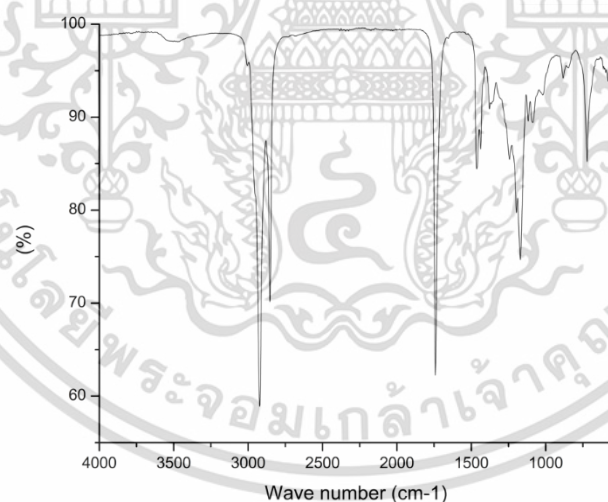
การสังเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพครั้งที่ 2 ที่ อุณหภูมิ 120°C, เวลา 180 นาที และอัตราส่วน FAME:EG 1:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ ก.3 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน FTIR

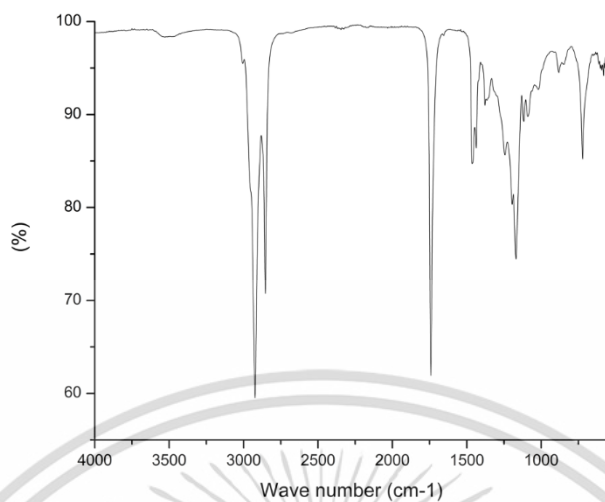
การสังเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพครั้งที่ 3 ที่ อุณหภูมิ 120°C, เวลา 180 นาที และอัตราส่วน FAME:EG 1:1



ภาพที่ ก.4 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน FTIR

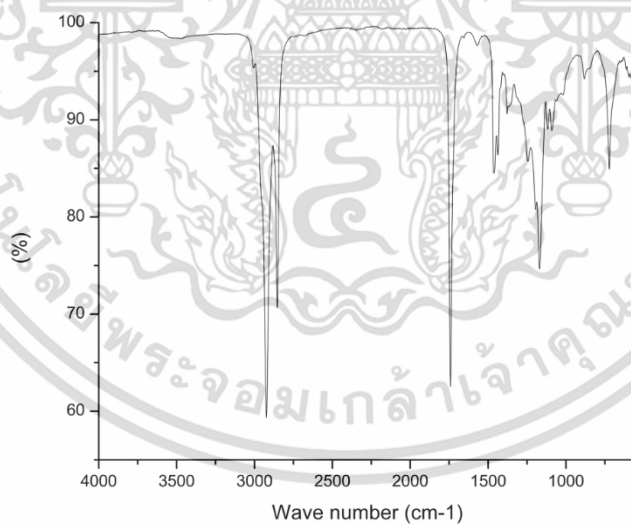
การสังเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพครั้งที่ 4 ที่ อุณหภูมิ 120°C, เวลา 180 นาที และอัตราส่วน FAME:EG 1:1.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ ก.5 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน FTIR

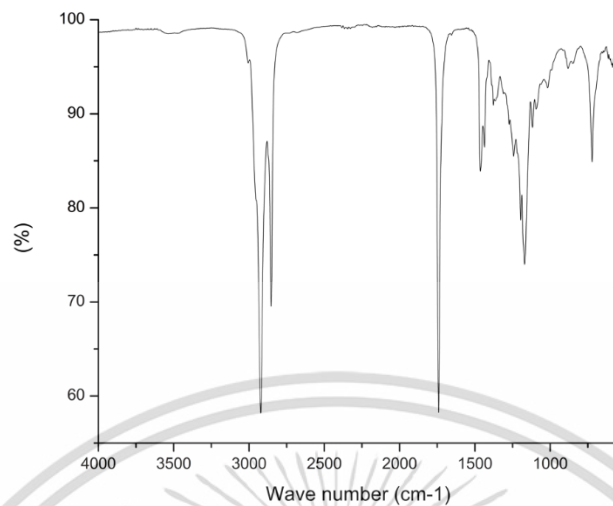
การสังเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพครั้งที่ 5 ที่ อุณหภูมิ 120°C, เวลา 180 นาที และอัตราส่วน FAME:EG 2:1



ภาพที่ ก.6 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน FTIR

การสังเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพครั้งที่ 6 ที่ อุณหภูมิ 120°C, เวลา 180 นาที และอัตราส่วน FAME:EG 2:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



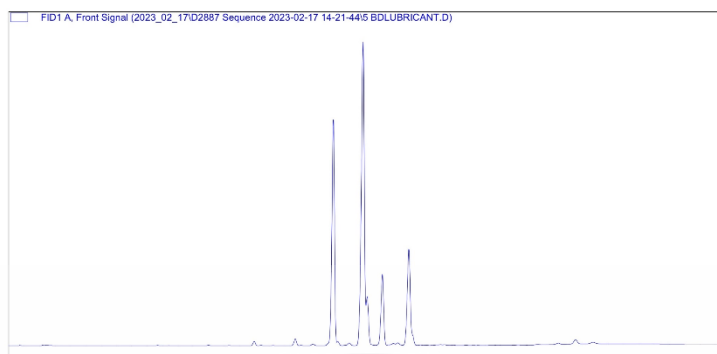
ภาพที่ ก.7 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน FTIR

การสังเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพครั้งที่ 7 ที่ อุณหภูมิ 120°C, เวลา 180 นาที และอัตราส่วน FAME:EG 3:1



ภาพที่ ก.8 ผลการวิเคราะห์ GC-SIM แสดงจำนวนคาร์บอนของ Biodiesel

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ ก.9 ผลการวิเคราะห์ GC-SIM แสดงจำนวนคาร์บอนของ Biolubricant



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

การสังเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพจากไบโอดีเซล



ภาพที่ ข.1 ตัวอย่างน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว (Waste cooking oil)



ภาพที่ ข.2 ตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซล (Biodiesel)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

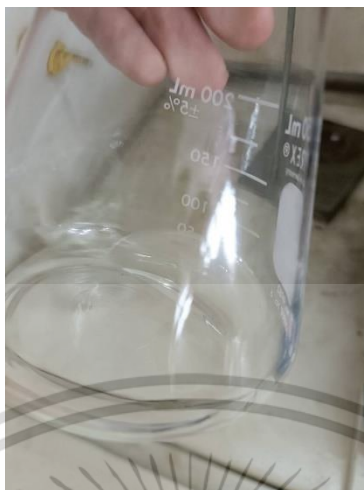


ภาพที่ ข.3 เอทิลีนไกลคอลและโพแทสเซียมคาร์บอเนต



ภาพที่ ข.4 การทำบริสุทธิ์น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ ข.5 เมทานอลที่เป็น by product ของการผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ



ภาพที่ ข.6 การกรองน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ ข.7 การวัดปริมาณน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพและผลิตภัณฑ์น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ



ภาพที่ ข.8 การทำงานของชุดรีฟลักซ์คอนเดนเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายธนากร ว่างซัง
 วัน เดือน ปี เกิด 3 ตุลาคม 2540
 ประวัติการศึกษา จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนบางกะปิ ปัจจุบันกำลังศึกษาในคณะ
 อุตสาหกรรมอาหารหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมแปรรูปอาหาร
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ประสบการณ์การทำงาน นักศึกษาฝึกงาน บริษัท เมคคานิคัล แอนด์ ฟู้ด โพรเซส เอ็นจิเนียริง จำกัด

ชื่อ-นามสกุล นายวรุฒิ ทองประดิษฐ์
 วัน เดือน ปี เกิด 13 มกราคม 2543
 ประวัติการศึกษา จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนบดินทรเดชา(สิงห์ สิงหเสนี)๔ ปัจจุบัน
 กำลังศึกษาในคณะอุตสาหกรรมอาหาร หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขา
 วิศวกรรมแปรรูปอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ประสบการณ์การทำงาน นักศึกษาฝึกงาน บริษัท อายิโนะโมะไต้ะ (ประเทศไทย) จำกัด

ชื่อ-นามสกุล นายอนุพันธ์ ทรัพย์มี
 วัน เดือน ปี เกิด 23 มิถุนายน 2543
 ประวัติการศึกษา จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนโรงเรียนรัตนโกสินทร์สมโภช
 ลาดกระบัง ปัจจุบันกำลังศึกษาในคณะอุตสาหกรรมอาหารหลักสูตรวิทยาศาสตร
 บัณฑิต สาขาวิศวกรรมแปรรูปอาหารสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
 ลาดกระบัง
 ประสบการณ์การทำงาน นักศึกษาฝึกงาน บริษัท อายิโนะโมะไต้ะ (ประเทศไทย) จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้