



## โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

**ชื่อโครงการ** การผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากกากกาแฟด้วยเอทิลแอซีเตตภาวะเหนือวิกฤตในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์

Biofuel production from spent coffee grounds using supercritical ethyl acetate in a batch reactor

**ชื่อนิสิต** นางสาวสลิลทิพย์ ไคร์ศรี **เลขประจำตัว** 6032968523

นางสาวอรพิมล อินทวิเชียร **เลขประจำตัว** 6032975923

**ภาควิชา** เคมีเทคนิค

**ปีการศึกษา** 2563

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ชื่อโครงการ** การผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากกากกาแฟคั่วด้วยเอทิลแอสีเตตภาวะเหนือวิกฤตในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์

**ชื่อนิติผู้ทำโครงการ** นางสาวสลิททิพย์ ไคร์ศรี 6032968523

นางสาวอรพิมล อินทวิเชียร 6032975923

**อาจารย์ที่ปรึกษา** ศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ งามประเสริฐสุทธิ

**อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม** ดร. เรืองวิทย์ สว่างแก้ว

**ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2563**

### บทคัดย่อ

กาแฟเป็นเครื่องดื่มที่ได้รับความนิยมแพร่หลายไปทั่วโลก ส่งผลให้ปัจจุบันอุตสาหกรรมกาแฟมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและมีแนวโน้มการบริโภคสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ก่อให้เกิดกากกาแฟเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตเป็นจำนวนมาก การใช้ทรัพยากรให้เกิดประโยชน์สูงสุดรวมไปถึงการเพิ่มมูลค่าของเสียผ่านนวัตกรรมที่ทันสมัยและลดปริมาณของเสียส่วนเกินในระบบให้น้อยลงจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการแก้ไขปัญหาเหล่านี้ โดยงานวิจัยนี้สนใจการสกัดน้ำมันกาแฟจากกากกาแฟคั่วบดด้วยเอทิลแอสีเตต โดยใช้กากกาแฟของเมล็ดสายพันธุ์อาราบิกา (Arabica) ที่ผ่านการคั่วในระดับคั่วเข้ม (Dark roast) ซึ่งน้ำมันกาแฟที่สกัดได้ให้ผลผลิตสูงสุดร้อยละ 20.74 โดยน้ำหนัก คิดเป็นร้อยละ 91.20 เมื่อเทียบกับการสกัดด้วยวิธีซอกซ์เลต (Soxhlet extraction) ที่ให้ผลผลิตสูงสุดร้อยละ 22.74 โดยน้ำหนัก ซึ่งน้ำมันกาแฟที่สกัดได้นำมาใช้ในการผลิตไบโอดีเซล (Biodiesel) ผ่านปฏิกิริยาอินเทอร์เอสเทอริฟิเคชัน (Interesterification reaction) ด้วยเอทิลแอสีเตตภาวะเหนือวิกฤต (Supercritical ethyl acetate) ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ โดยตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิในช่วง 300-375 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาตั้งแต่ 20-40 นาที ภายใต้ความดัน 15 เมกะพาสคัล พบว่าภาวะที่เหมาะสม คือ อุณหภูมิที่ 325 องศาเซลเซียสและเวลาในการทำปฏิกิริยา 50 นาที ให้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงชีวภาพที่มีปริมาณเอทิลเอสเทอร์สูงที่สุดร้อยละ 91.80 โดยน้ำหนัก การผลิตไบโอดีเซลจากกากกาแฟนอกจากจะช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากกาแฟแล้ว ยังเป็นหนึ่งในวิธีการผลิตพลังงานทางเลือกเพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับกากกาแฟคั่วบดด้วย

**คำสำคัญ:** การผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ, กากกาแฟคั่ว, เอทิลแอสีเตตภาวะเหนือวิกฤต, ปฏิกิริยาอินเทอร์เอสเทอริฟิเคชัน

ภาควิชาเคมีเทคนิค

ลายมือชื่อนิสิต

กัลลิกพงษ์

สาขาเคมีวิศวกรรม

กมล.

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

กมล.

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

กมล.

**Title** Biofuel production from spent coffee grounds using supercritical ethyl acetate in a batch reactor

**Names of Students** Miss Salintip Khraisri 6032968523

Miss Aonpimon Intavichean 6032975923

**Advisor** Prof. Dr. Somkiat Ngamprasertsith

**Co-advisor** Dr. Ruengwit Sawangkeaw

**Department of Chemical Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Academic Year 2020**

### **Abstract**

Coffee is a worldwide popular beverage that makes coffee industries rapidly changing and increasing consumption. These cause a lot of wastes from the coffee production, it called spent coffee grounds (SCGs). Enhancing the resource utilization, including wastes valuating through modern manufacturing innovations and minimizing the amount of excess wastes resolve this problem. In this research, coffee oil was extracted from SCGs by using ethyl acetate. The SCGs was obtained from dark roasted Arabica coffee beans that gave maximum oil yield at 20.74% by weight. It was 91.20% when compared to Soxhlet extraction which gave maximum oil yield at 22.74% by weight. The extracted coffee oil was used for biodiesel production through transesterification reaction by using supercritical ethyl acetate in a batch reactor. The studied variables in this research are temperature in the range from 300 to 375 °C and reaction time in the range from 20 to 40 minutes under the pressure of 15 MPa. The optimal condition was found at temperature of 325 °C and reaction time of 50 minutes that gave the highest FAEs at 91.80% by weight. Moreover, biodiesel production from SCGs can reduce the environmental impact and the disposal cost of SCGs. The alternative energy production simultaneously increased valuation of SCGs.

Keywords: Biofuel production, Spent coffee grounds, Supercritical ethyl acetate,  
Interesterification reaction

Department of Chemical Technology

Major: Chemical Engineering

Student's Signature ..... กสิศทิพย์

.....

Advisor's Signature ..... Pankiat N.

Co-advisor's Signature ..... Ruengwit S.

### กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการเรียนการสอนระดับปริญญาตรี เพื่อสร้างเสริมประสบการณ์ประจำปี การศึกษา 2563 ของภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ความสำเร็จของโครงการ “การผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากกากกาแฟด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์”

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษา และ ดร. เรืองวิทย์ สว่างแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่คอยให้ความรู้ คำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่างๆ ในการวิจัย เสียสละเวลาอันมีค่าให้ความช่วยเหลือ ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ตลอดทั้งโครงการ

ขอขอบคุณ คุณวิลาสินี ศุภางค์ ที่คอยช่วยเหลือให้คำปรึกษา คำแนะนำวิธีการใช้เครื่องมือต่างๆ ในงานวิจัย ดูแลการทำวิจัย และแก้ไขข้อผิดพลาดต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่ง

ขอขอบคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิค ที่อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการ พร้อมทั้งคำแนะนำต่างๆ ในการใช้เครื่องมืออย่างปลอดภัย

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา รวมถึงผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่คอยให้กำลังใจ สนับสนุน และช่วยเหลือให้ งานวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์

โครงการนี้ได้รับเงินสนับสนุนจากโครงการการเรียนการสอนเพื่อสร้างเสริมประสบการณ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2563

คณะผู้จัดทำ

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ฅ
สารบัญภาพ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 กาแฟ	3
2.2 กากกาแฟ	3
2.3 เทคโนโลยีและกระบวนการผลิตไบโอดีเซล	5
2.3.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล	5
2.3.2 ปฏิกริยาทั่วไปในการผลิตไบโอดีเซล	7
2.3.3 ปฏิกริยาทางเลือกในการผลิตไบโอดีเซล	10
2.4 การสกัดน้ำมันกาแฟ	11
2.4.1 การสกัดด้วยตัวทำละลาย	12

เรื่อง	หน้า
2.4.2 หลักในการเลือกตัวทำละลายที่เหมาะสม	12
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	12
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	15
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี	15
3.1.1 อุปกรณ์	15
3.1.2 สารเคมี	15
3.2 รายละเอียดวิธีการทดลอง	15
3.2.1 การเตรียมกากกาแฟ	15
3.2.2 ปริมาณความชื้นในกากกาแฟ	16
3.2.3 ปริมาณน้ำมันในกากกาแฟ	16
3.2.4 การสกัดน้ำมันจากกากกาแฟด้วยเอทิลแอลกอฮอล์	16
3.2.5 องค์ประกอบในน้ำมันกาแฟโดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์	17
3.2.6 การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันกาแฟในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์	18
3.2.7 การวิเคราะห์หาปริมาณเอทิลเอสเทอร์ของไบโอดีเซลด้วยแก๊สโครมาโทกราฟี	19
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	20
4.1 ลักษณะของน้ำมันกาแฟ	20
4.1.1 ปริมาณความชื้นในกากกาแฟ	20
4.1.2 ปริมาณน้ำมันในกากกาแฟ	20
4.1.3 น้ำมันกาแฟจากการสกัดด้วยเอทิลแอลกอฮอล์	21
4.1.4 องค์ประกอบในน้ำมันกาแฟ	21



เรื่อง	หน้า
4.2 ผลของอุณหภูมิและเวลาในการผลิตไบโอดีเซลจากกากกาแฟคั่ว	21
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะในงานวิจัย	27
5.1 สรุปผลการทดลอง	27
5.2 ข้อเสนอแนะในงานวิจัย	27
ภาคผนวก	28
ภาคผนวก ก	29
ก.1 การคำนวณหาน้ำหนักของน้ำมันกาแฟที่ใช้ทำปฏิกิริยา	29
ก.2 กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ไบโอดีเซลด้วยแก๊สโครมาโทกราฟี	30
บรรณานุกรม	31

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบกรดไขมันในน้ำมันกาแฟ	4
2.2 หมู่คาร์บอกซิเลตเอสเทอร์ที่ใช้สำหรับการผลิตไบโอดีเซลในภาวะเหนือวิกฤต	11
3.1 ภาวะของแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์สำหรับการวิเคราะห์หาองค์ประกอบ ในน้ำมันกาแฟ	17
3.2 ภาวะของแก๊สโครมาโทกราฟีสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณของกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์	19
ก.1 น้ำหนักของสารละลายน้ำมันกาแฟในเอทิลแอสีเตตสำหรับแต่ละอุณหภูมิในการผลิตไบโอดีเซล	29

## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 กากกาแฟคั่วบด	3
2.2 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน	7
2.3 เฟสไดอะแกรมของสารบริสุทธิ์	9
2.4 ปฏิกริยาอินเทอร์เอสเทอร์ิฟิเคชัน	10
3.1 กากกาแฟคั่วเข้ม	16
3.2 น้ำมันกาแฟจากกากกาแฟคั่วบด	17
3.3 เครื่องมือการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันกาแฟด้วยเอทิลแอลกอฮอล์สถานะเหนือวิกฤต	18
4.1 ร้อยละผลได้ของกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ที่ความดัน 15 เมกะพาสคัล และอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ที่เวลา 20-40 นาที	22
4.2 ร้อยละผลได้ของกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ที่ความดัน 15 เมกะพาสคัล และอุณหภูมิ 325 องศาเซลเซียส ที่เวลา 20-40 นาที	22
4.3 ร้อยละผลได้ของกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ที่ความดัน 15 เมกะพาสคัล และอุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ที่เวลา 20-40 นาที	23
4.4 ร้อยละผลได้ของกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ที่ความดัน 15 เมกะพาสคัล และอุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียส ที่เวลา 20-40 นาที	24
4.5 ร้อยละผลได้ของกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ที่ความดัน 15 เมกะพาสคัล และอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ที่เวลา 20-60 นาที	25
4.6 ร้อยละผลได้ของกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ที่ความดัน 15 เมกะพาสคัล และอุณหภูมิ 325 องศาเซลเซียส ที่เวลา 20-60 นาที	25
ก.1 สมการสถานะของเพง-โรบินสัน	29
ก.2 กราฟมาตรฐานของเอทิลปาล์มมิเตต	30
ก.3 กราฟมาตรฐานของเอทิลโอลิเอต	30

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจ

การพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจและอุตสาหกรรม และการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากร ส่งผลให้ความต้องการในการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลสูงขึ้นตามไปด้วย ในขณะที่แหล่งพลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิลที่มีอยู่เริ่มขาดแคลน ปัจจุบันจึงได้มีการมองหาแหล่งพลังงานที่จะสามารถนำมาเป็นพลังงานทดแทนได้ ไบโอดีเซล (Biodiesel) เป็นเชื้อเพลิงชีวภาพที่ผลิตจากแหล่งทรัพยากรหมุนเวียน เช่น น้ำมันพืช ไขมันสัตว์ หรือสาหร่าย ไบโอดีเซลเป็นพลังงานทางเลือกนอกเหนือจากดีเซลที่ผลิตจากปิโตรเลียม โดยมีสมบัติการเผาไหม้เหมือนกับดีเซลและสามารถใช้ทดแทนกันได้ อีกทั้งสามารถย่อยสลายได้เองตามกระบวนการชีวภาพในธรรมชาติ และไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม [1] อย่างไรก็ตามกระบวนการผลิตไบโอดีเซลในปัจจุบัน ต้นทุนส่วนใหญ่เกิดจากราคาของน้ำมันพืชที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบ ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 66 ของต้นทุนในการผลิตทั้งหมด ดังนั้น จึงได้มีการทดลองกันอย่างกว้างขวาง เพื่อแสวงหาวัตถุดิบชนิดใหม่ที่จะนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตไบโอดีเซล [2]

ปัจจุบันอุตสาหกรรมกาแฟมีแนวโน้มการขยายตัวเพิ่มมากขึ้น ก่อให้เกิดของเสียเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตเป็นจำนวนมาก นั่นคือ กากกาแฟ (Spent Coffee Grounds; SCGs) ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่มีประโยชน์มากมายด้วยส่วนประกอบของน้ำมัน เส้นใย และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ กากกาแฟจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจที่จะนำมาใช้ผลิตไบโอดีเซล เนื่องจากกากกาแฟมีสัดส่วนของน้ำมันอยู่ที่ร้อยละ 10-30 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นปริมาณที่เหมาะสมในการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อทดแทนน้ำมันพืชชนิดอื่นๆ

เอทิลแอลกอฮอล์สถานะเหนือวิกฤต เป็นเทคนิคการใช้สารที่อุณหภูมิ และความดันเหนือจุดวิกฤต จะมีสมบัติในการซึมผ่านของแข็งได้เหมือนแก๊ส และสามารถละลายสารได้เหมือนของเหลว จึงใช้ทำปฏิกิริยาได้ดี ซึ่งจุดวิกฤตของเอทิลแอลกอฮอล์ คือที่ความดันมากกว่า 38.3 บาร์ และอุณหภูมิสูงกว่า 250 องศาเซลเซียส [3]

งานวิจัยนี้สนใจศึกษาการสกัดน้ำมันกาแฟจากกากกาแฟด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ และศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันกาแฟด้วยเอทิลแอลกอฮอล์สถานะเหนือวิกฤตในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิในช่วง 300-375 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยาตั้งแต่ 20-40 นาที ภายใต้ความดัน 15 เมกะพาสคัล เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ และวิเคราะห์หาปริมาณเอทิลเอสเทอร์ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงชีวภาพจากเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography)

## 1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

เพื่อศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันกาแฟผ่านปฏิกิริยาอินเทอร์เอสเทอริฟิเคชันด้วยเอทิลแอสีเตตภาวะเหนือวิกฤตในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

ทดลองสกัดน้ำมันกาแฟจากกากกาแฟคั่วบด เพื่อนำมาใช้ในการผลิตไบโอดีเซลด้วยเอทิลแอสีเตตภาวะเหนือวิกฤต โดยเปรียบเทียบร้อยละผลได้และองค์ประกอบในน้ำมันและหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพที่มีเอทิลเอสเทอร์ปริมาณสูงที่สุด

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

จากการศึกษาค้นคว้าข้อมูล ทฤษฎี งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และจากการทำการทดลอง ทำให้ทราบถึงภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากกากกาแฟคั่วบดด้วยเอทิลแอสีเตตภาวะเหนือวิกฤตในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ เพื่อนำไปพัฒนาต่อยอดในงานวิจัยอื่นๆต่อไป อีกทั้งสามารถนำภาวะที่เหมาะสมไปผลิตไบโอดีเซล เพื่อสร้างพลังงานทางเลือกและใช้ทรัพยากรให้เกิดประโยชน์สูงสุด และเรียนรู้การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันจากเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาคุณภาพและกระบวนการการผลิตน้ำมันให้มีมาตรฐาน

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กาแฟ (Coffee) [5]

กาแฟเป็นเครื่องดื่มที่ทำจากเมล็ดซึ่งได้จากต้นกาแฟ มีการปลูกต้นกาแฟในมากกว่า 70 ประเทศทั่วโลก กาแฟมีส่วนประกอบของคาเฟอีน ทำให้มีสรรพคุณชูกำลังในมนุษย์ ปัจจุบันกาแฟเป็นเครื่องดื่มซึ่งได้รับความนิยมมากที่สุดในโลก [4] และเป็นหนึ่งในสินค้าที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศ กาแฟถูกใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ อย่างแพร่หลาย ตั้งแต่อาหาร เครื่องดื่ม เครื่องสำอาง รวมไปถึงผลิตภัณฑ์ดูแลรักษาบ้าน ปัจจุบันอุตสาหกรรมกาแฟมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและมีแนวโน้มการบริโภคสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง สำหรับประเทศไทย ความต้องการใช้เมล็ดกาแฟในประเทศปี 2561 อยู่ที่ 95,000 ตันต่อปี แต่ภายในประเทศผลิตได้เพียง 23,617 ตัน จึงต้องนำเข้าถึง 68,616 ตัน หรือคิดเป็นร้อยละ 72 เพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการใช้ภายในประเทศ [5]

#### 2.2 กากกาแฟ (Spent Coffee Grounds: SCGs) [6]

กากกาแฟ คือผงของกาแฟคั่วบดที่ผ่านการสกัดผ่านน้ำร้อน แสดงดังรูปที่ 2.1 การชงกาแฟสดจะไม่นำกากกาแฟที่ใช้แล้วมาชงซ้ำเพราะจะทำให้ความหอมและรสชาติคุณภาพต่ำลง คาเฟอีนที่ได้ก็จะต่ำลงเช่นกัน กากกาแฟจัดเป็นสารอินทรีย์ที่เหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมการแปรรูปกาแฟและร้านกาแฟสดทั่วไปซึ่งกากกาแฟนี้ถือว่าเป็นกากของเสียที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เพราะมีปริมาณคาร์บอนเป็นองค์ประกอบจำนวนมาก หากมีการทิ้งลงสู่แหล่งน้ำจะส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ต้องการใช้ในการย่อยสลายอินทรีย์สารที่มีอยู่ในน้ำ (Biochemical Oxygen Demand; BOD) มีปริมาณสูงขึ้น และหากมีการจัดการกากกาแฟที่ไม่ดี อาจกลายเป็นแหล่งสะสมของเชื้อราและแบคทีเรียที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ได้ [6]



รูปที่ 2.1 กากกาแฟคั่วบด [6]

จากปริมาณการบริโภคกาแฟในประเทศไทย เราจะมีกากกาแฟเหลือทิ้งเป็นจำนวนมากกว่า 290,000 ตัน/ปี ในปี 2565 [7] โดยการจัดการกากกาแฟในอุตสาหกรรมกาแฟสำเร็จรูป จะนำกากกาแฟไปเผาเพื่อสร้างเป็นพลังงานความร้อนใช้ในกระบวนการผลิต และในภาคครัวเรือนและร้านอาหารส่วนใหญ่จะส่งกำจัด ปัจจุบันกระแสสิ่งแวดล้อมกำลังเป็นที่จับตามอง ทำให้มีการรณรงค์ลดปริมาณขยะ และนำขยะเหล่านั้นมาแปรรูปเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมต่อไป ซึ่งเรียกแนวคิดนี้ว่า แนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economic) กากกาแฟเองถือได้ว่าเป็นวัตถุดิบที่มีประโยชน์มากมายด้วยส่วนประกอบของมัน เช่น น้ำมัน เส้นใย และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ โดยเฉพาะสารต้านอนุมูลอิสระ อาจถือได้ว่ากากกาแฟสามารถนำมาใช้ทดแทนวัตถุดิบที่มาจากปิโตรเลียม หรือมาจากแหล่งอาหาร (Edible feedstock) ซึ่งนอกจากจะช่วยเรื่องสิ่งแวดล้อมและความมั่นคงด้านพลังงานและอาหารแล้ว ยังเป็นการลดการใช้จ่ายในการกำจัดกากกาแฟและต้นทุนในการผลิตผลิตภัณฑ์ได้อีกด้วย

ปัจจุบันอุตสาหกรรมกาแฟมีแนวโน้มการเติบโตสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้กากกาแฟที่เหลือจากกระบวนการผลิตกาแฟมีแนวโน้มสูงขึ้นด้วย การนำกากกาแฟมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากมีงานวิจัยพบว่าในกากกาแฟมีส่วนของน้ำมันสูงถึงร้อยละ 10-30 โดยน้ำหนัก ซึ่งน้ำมันกาแฟประกอบด้วยกรดไขมันหลัก 2 ชนิด ได้แก่ กรดปาล์มมิติก (Palmitic acid) และกรดลิโนเลอิก (Linoleic acid) ซึ่งมีสมบัติคล้ายน้ำมันปาล์ม สามารถนำมาต่อยอดเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล [7] แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบกรดไขมันในน้ำมันกาแฟ [7]

Common name	Fatty acid	Content (wt.%)
Myristic acid	C14 : 0	0.07±0.01
Palmitic acid	C16 : 0	33.75±0.15
Stearic acid	C18 : 0	7.26±0.32
Oleic acid	C18 : 1	7.72±0.13
Linoleic acid	C18 : 2	44.64±0.37
Linolenic acid	C18 : 3	2.16±0.01
Arachidic acid	C20 : 0	3.04±0.08
Eicosenoic acid	C20 : 1	0.26±0.00
Eicosapentaenoic acid	C20 : 5	0.26±0.00
Heneicosanoic acid	C21 : 0	0.08±0.01
Docosanoic acid	C22 : 0	0.66±0.03
Hexacosanoic acid	C23 : 0	0.09±0.01

## 2.3 เทคโนโลยีและกระบวนการผลิตไบโอดีเซล (Biodiesel production) [8]

ปัจจุบันมีการใช้พลังงานจากปิโตรเลียมเป็นจำนวนมาก ซึ่งพลังงานประเภทนี้มีอยู่อย่างจำกัดและหาทดแทนได้ยาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาพลังงานรูปแบบใหม่มาทดแทนคือ พลังงานจากเชื้อเพลิงชีวภาพ ซึ่งมีอยู่หลายชนิดได้แก่ ไบโอดีเซล เอทานอล และก๊าซชีวภาพ ข้อดีของเชื้อเพลิงชีวภาพ คือ ความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม การใช้ไบโอดีเซลแทนน้ำมันดีเซลสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ร้อยละ 60 อีกทั้งการใช้ไบโอเอทานอล (Bioethanol) ผสมกับเมทานอล (Methanol) และไดเมทิลอีเทอร์ (Dimethyl ether) จะช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ร้อยละ 70 และ 90 ตามลำดับ [8] หลายประเทศที่ใช้พลังงานทางเลือกแล้ว เช่น ประเทศในทวีปยุโรปได้ผลิตเอทานอลจากธัญพืชและไบโอดีเซลจากเมล็ดเรพ (Rapeseed) ในประเทศบราซิลผลิตไบโอเอทานอลจากอ้อยเป็นเชื้อเพลิงหลักประมาณร้อยละ 70 และประเทศในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ใช้น้ำมันปาล์มสำหรับผลิตไบโอดีเซล

### 2.3.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล

วัตถุดิบหลักหรือสารตั้งต้นในการผลิตไบโอดีเซลคือ น้ำมันพืชและไขมันสัตว์ ราคาของวัตถุดิบประเภทน้ำมันหรือไขมันคิดเป็นร้อยละ 60-75 ของราคาไบโอดีเซล วัตถุดิบที่มีราคาถูก เช่น ไขมัน จะทำให้เสียค่าใช้จ่ายเพิ่มเพื่อทำให้ผลิตภัณฑ์บริสุทธิ์ การพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาและกระบวนการต่างๆสามารถทำให้ต้นทุนมีราคาถูกลง การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชปกติจะมีราคาแพงกว่าน้ำมันดีเซล ร้อยละ 10-15 ราคาที่สูงของไบโอดีเซลจึงเป็นอุปสรรคสำคัญทางการค้า มีรายงานว่าน้ำมันที่ใช้แล้วสามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลได้ โดยมีข้อดีคือ ราคาถูก แต่ข้อเสียคือมีการปนเปื้อนมากกว่าน้ำมันพืชที่ยังไม่ได้ใช้ วัตถุดิบประเภทน้ำมันที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลในปัจจุบันมี 3 ชนิดคือ น้ำมันพืช ไขมันสัตว์ และน้ำมันที่ใช้แล้ว ดังรายละเอียดต่อไปนี้

#### 2.3.1.1 น้ำมันพืช

วัตถุดิบที่นำมาผลิตไบโอดีเซลมีหลายชนิดที่สำคัญคือ น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันปาล์ม น้ำมันจากเมล็ดฝ้ายและเมล็ดองุ่น นอกจากนี้ยังมีพืชชนิดอื่นๆ ที่สามารถนำน้ำมันมาสกัดเพื่อผลิตเป็นไบโอดีเซลได้ เช่น น้ำมันละหุ่ง น้ำมันรำข้าว น้ำมันดอกทานตะวัน น้ำมันถั่วลิสง น้ำมันงา ฯลฯ วิธีการสกัดน้ำมันออกจากพืชโดยการนำพืชหรือวัตถุดิบเหล่านั้นไปกด จากนั้นนำไปสกัดด้วยเฮกเซน ส่วนอีกวิธีการคือ การแช่ด้วยตัวทำละลายจากนั้นนำไปกรอง น้ำมันพืชประกอบด้วยกรดไขมันอิสระที่มีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่ 14-20 อะตอม ซึ่งมีจำนวนและตำแหน่ง



ของพันธะคู่ที่แตกต่างกัน โดยพบว่าน้ำมันจากเมล็ดองุ่นมีชนิดและปริมาณของกรดไขมันตั้งนี้ กรดโอเลอิก > กรดลิโนเลอิก > กรดลิโนเลนิก > กรดปาล์มมิติก โดยน้ำมันดอกคำฝอย (Safflower oil) และน้ำมันลินซีด (Linseed oil) มีกรดลิโนเลอิกและกรดลิโนเลนิกสูง ขณะที่ น้ำมันปาล์มมีกรดไขมันชนิดอิ่มตัวสูงคือ กรดปาล์มมิติก ประเทศที่นำน้ำมันจากพีชมาใช้ผลิตไบโอดีเซลบ้างแล้ว เช่น ประเทศสหรัฐอเมริกาใช้น้ำมันถั่วเหลือง ประเทศในทวีปยุโรปใช้น้ำมันจากเมล็ดเรป (Rapeseed) ประเทศอินเดียใช้น้ำมันปาล์ม สำหรับประเทศไทยสามารถใช้วัตถุดิบหลายชนิด เช่น น้ำมันปาล์มจากผลปาล์ม (Palm kernel oil) และน้ำมันมะพร้าว (Coconut oil) โดยน้ำมันปาล์มถูกนำมาผลิตไบโอดีเซลมากที่สุด รองลงมาคือ น้ำมันมะพร้าว น้ำมันถั่วเหลือง และสบู่ดำ

### 2.3.1.2 ไขมันสัตว์

ไขมันจากสัตว์ที่นำมาผลิตไบโอดีเซล ได้แก่ ไขมันจากไก่ น้ำมันหมูและไขมันจากวัว องค์ประกอบของไขมันสัตว์พบว่ามีกรดโอเลอิก (C18:1) มากที่สุดประมาณร้อยละ 41-44 รองลงมาคือ กรดปาล์มมิติก (C16:0) ร้อยละ 23 และกรดสเตียริก (C18:0) ร้อยละ 13 โดยองค์ประกอบของไขมันสัตว์กับน้ำมันถั่วเหลืองมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนคือ น้ำมันถั่วเหลืองมีกรดลิโนเลอิก (C18:2) มากที่สุดร้อยละ 52 รองลงมาคือ กรดโอเลอิกร้อยละ 21 และกรดปาล์มมิติกร้อยละ 11 ความหนืดของไบโอดีเซลที่มาจากไขมันสัตว์มีค่าสูงกว่าจากน้ำมันถั่วเหลืองเล็กน้อยแต่ยังอยู่ในเกณฑ์ของสมาคมวิชาชีพทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (American Society for Testing and Materials; ASTM) อาจเนื่องมาจากน้ำมันถั่วเหลืองมีปริมาณกรดไขมันอิ่มตัวสูงกว่าไขมันสัตว์ การใช้ไขมันสัตว์ในการผลิตไบโอดีเซลมีข้อดีคือ ราคาไม่แพง หาได้จากโรงงานอุตสาหกรรม แต่มีข้อเสียคือ ไบโอดีเซลที่ได้จะมีคุณสมบัติในการไหลเท (Pour point) ต่ำ แต่สามารถแก้ไขได้โดยการกลั่นแยกส่วนก่อนทำปฏิกิริยา

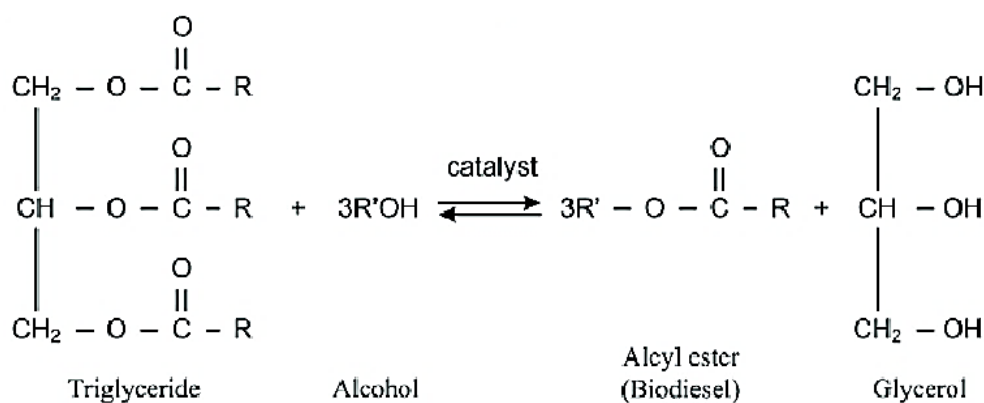
### 2.3.1.3 น้ำมันที่ใช้แล้ว

น้ำมันที่ใช้แล้วมีปริมาณกรดไขมันอิสระสูงกว่าน้ำมันที่ยังไม่ได้ใช้ สามารถตรวจสอบได้โดยการหาค่าความเป็นกรด (Acid value) ด้วยวิธีการไทเทรต (Titration) พบว่า น้ำมันที่ใช้แล้วมีค่าความเป็นกรดและมีความหนืดเชิงโคเคนติกสูงกว่าน้ำมันที่ยังไม่ได้ใช้ น้ำมันที่ใช้แล้วต้องใช้เวลาความเข้มข้นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้ได้ปริมาณเอสเทอร์มากกว่าน้ำมันที่ยังไม่ได้ใช้ประมาณ ร้อยละ 10 ไบโอดีเซลที่ได้จากน้ำมันใช้แล้วมีสิ่งเจือปนมากกว่าน้ำมันที่ยังไม่ได้ใช้ แต่มีข้อดีคือ ทำให้

ราคาไบโอดีเซลถูกกว่าน้ำมันปิโตรเลียม การใช้วัตถุดิบที่เหลือทิ้ง เช่น น้ำมันจากร้านอาหารหรือโรงงานอุตสาหกรรมมาผลิตไบโอดีเซล จะทำให้น้ำมันไบโอดีเซลมีราคาถูกและช่วยรัฐบาลแบ่งเบาภาระในการกำจัดวัตถุดิบที่ใช้แล้วเหล่านั้น น้ำมันที่ใช้แล้วและไขมันสัตว์ถือว่ามีคุณภาพต่ำกว่าน้ำมันพืชกลั่นบริสุทธิ์ในด้านของปริมาณกรดไขมันอิสระ จึงต้องมีการบำบัดก่อนนำมาผลิตไบโอดีเซล แม้ว่าไขมันสัตว์และน้ำมันที่ใช้แล้วจะเป็นแหล่งวัตถุดิบราคาไม่แพงสำหรับผลิตไบโอดีเซลก็ตาม แต่ปริมาณของกรดไขมันอิสระที่สูงทำให้วัตถุดิบประเภทนี้ไม่เหมาะกับการผลิตไบโอดีเซลร่วมกับต่างโดยตรงเนื่องจากอาจเกิดสบู่ปะปนออกมาด้วย

### 2.3.2 ปฏิกริยาทั่วไปในการผลิตไบโอดีเซล (Conventional reaction for biodiesel production)

การผลิตไบโอดีเซลทางการค้าจำเป็นต้องอาศัยความรู้และเทคโนโลยีต่างๆ เพื่อให้การผลิตไบโอดีเซลมีความคุ้มค่าและสามารถผลิตเพื่อจำหน่ายทางการค้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ กระบวนการทั่วไปที่นิยมใช้ในปัจจุบัน คือ ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน (Transesterification) หรือปฏิกริยาแอลกอฮอล์ไลซิส (Alcoholysis) แสดงดังรูปที่ 2.2 คือ การเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) ที่มีอยู่ในน้ำมันหรือไขมันด้วยแอลกอฮอล์เพื่อทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เอสเทอร์ของกรดไขมัน (Fatty Acid Alkyl Ester; FFAE) ที่เรียกว่า ไบโอดีเซล และกลีเซอรอล (Glycerol) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกริยาประเภทเบสหรือกรด หรืออาจจะไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกริยา



รูปที่ 2.2 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน [8]

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเริ่มจากการนำน้ำมันที่สกัดได้มาให้ความร้อนจากนั้นเติม แอลกอฮอล์ โดยทั่วไปนิยมใช้เมทานอลและเอทานอลมากที่สุด การใช้เอทานอลมีข้อดีคือ ได้จากพืช ทำให้สามารถหาทดแทนได้และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม การทำปฏิกิริยาต้องนำน้ำมันหรือไขมันมาผสมกับ แอลกอฮอล์โดยเติมตัวเร่งปฏิกิริยาทันที จากนั้นนำไปปั่นกววน โดยกำหนดระยะเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ เมื่อปฏิกิริยาเสร็จสมบูรณ์จะได้สารละลายแยกเป็น 2 ชั้น ชั้นบนเป็นเอสเทอร์ของกรดไขมันและชั้นล่าง เป็นกลีเซอรอล

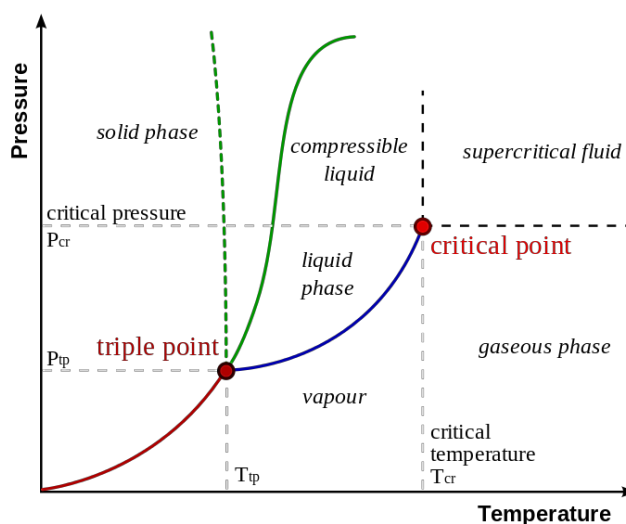
### 2.3.2.1 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยการใช้เบสสามารถเกิดได้เร็วกว่าการใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณที่เท่ากัน จะเห็นได้จากโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่นิยมใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากการศึกษาพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) มีประสิทธิภาพดีที่สุด รองลงมาคือ ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โซเดียมเมทอกไซด์ (CH<sub>3</sub>ONa) และโพแทสเซียมเมทอกไซด์ (CH<sub>3</sub>OK) ตามลำดับ การใช้เบสในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันทำให้เกิดสบู่ได้ เนื่องจากไฮดรอกไซด์ของโลหะทำปฏิกิริยากับกรดไขมันอิสระ จึงมีการสูญเสียไตรกลีเซอไรด์บางส่วนไป สบู่ที่เกิดขึ้นจะเพิ่มความหนืดเพิ่มขึ้นและจับตัวเป็นก้อน ทำให้ขั้นตอนในการแยกให้บริสุทธิ์มีความยุ่งยากมากขึ้นและเสียค่าใช้จ่ายสูง

การใช้กรดในการเร่งปฏิกิริยามีข้อดีคือ สามารถใช้กับวัตถุดิบที่มีความชื้นและปริมาณกรดไขมันอิสระสูง เช่น สามารถใช้ได้กับน้ำมันทำอาหารที่มีกรดไขมันอิสระสูงถึงร้อยละ 6 การใช้กรดสามารถเร่งปฏิกิริยาได้ทั้งทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันและเอสเทอร์ฟิเคชัน (Esterification) การใช้กรดจะมีความประหยัดกว่าการใช้เบส แต่ก็ทำให้ปฏิกิริยาเกิดช้ากว่าถึง 4,000 เท่า และต้องใช้อุณหภูมิสูงในการทำปฏิกิริยา ทำให้การใช้กรดในการเร่งปฏิกิริยาเหมาะสมกับวัตถุดิบที่เป็นไขมันสัตว์หรือไขมันที่ใช้แล้ว [8]

### 2.3.2.2 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกริยา

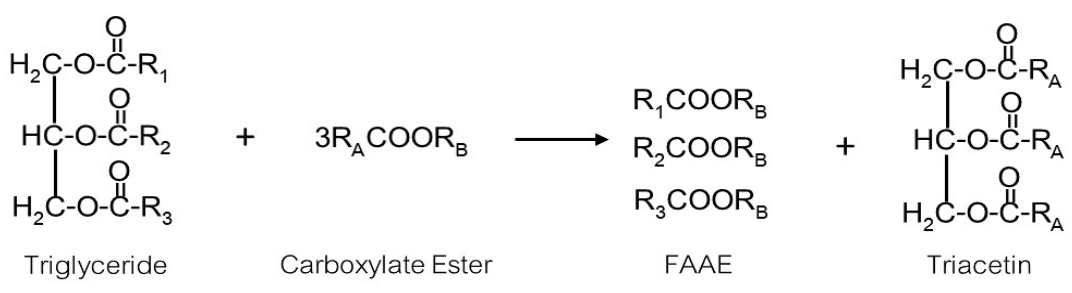
การผลิตไบโอดีเซลแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกริยาแต่ใช้เมทานอลภาวะเหนือวิกฤต (Supercritical methanol) เป็นวิธีการแบบขั้นตอนเดียวเพื่อเปลี่ยนไขมันเป็นไบโอดีเซลด้วยวิธีทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้อุณหภูมิ 280-350 องศาเซลเซียส และความดัน 20-50 เมกะพาสคัล ตามลำดับ อุณหภูมิและความดันเป็นตัวแปรสำคัญในการผลิตไบโอดีเซลที่ภาวะเหนือวิกฤต การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้ปฏิกริยาเกิดได้ดีขึ้น แต่ที่อุณหภูมิสูง (มากกว่า 350 องศาเซลเซียส) ร้อยละผลได้ของปฏิกริยาจะลดลง เนื่องจากการสลายตัวของน้ำมัน (Oil decomposition) การใช้ของไหลภาวะเหนือวิกฤต (Supercritical fluid) เป็นเทคนิคการใช้สารที่มีสมบัติร่วมกันระหว่างของเหลวและแก๊ส แสดงดังรูปที่ 2.3 โดยมีความหนาแน่นคล้ายของเหลวจึงมีความสามารถในการละลายสารต่างๆ ได้ดี มีสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) คล้ายแก๊สและความหนืดต่ำกว่าของเหลวจึงทำให้การถ่ายเทมวลสาร (Mass transfer) และความสามารถในการซึมผ่านเกิดขึ้นได้ดี นอกจากนี้ ของไหลภาวะเหนือวิกฤตยังเป็นเทคโนโลยีที่สามารถใช้กับวัตถุดิบที่หลากหลาย เช่น น้ำมันที่ใช้แล้ว สร้างของเสียน้อยกว่าวิธีการทั่วไปและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [9]



รูปที่ 2.3 เฟสไดอะแกรมของสารบริสุทธิ์ [9]

### 2.3.3 ปฏิกริยาทางเลือกในการผลิตไบโอดีเซล (Alternative reaction for biodiesel production)

การผลิตไบโอดีเซลโดยทั่วไปจะผลิตจากน้ำมันพืชและแอลกอฮอล์ด้วยปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน เกิดเป็นเอสเทอร์ของกรดไขมัน และมีกลีเซอรอลเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิต อุตสาหกรรมการผลิตไบโอดีเซลมีแนวโน้มที่จะเพิ่มมากขึ้นในอนาคต ส่งผลให้มีปริมาณกลีเซอรอลมากเกินไป ความต้องการและจะต้องถูกจัดการในรูปของเสีย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษากการผลิตไบโอดีเซลแบบไม่เกิดกลีเซอรอล โดยการทำปฏิกริยาอินเทอร์เอสเทอร์ิฟิเคชัน (Interesterification reaction) แสดงดังรูปที่ 2.4 ระหว่างน้ำมันกาแฟกับเอทิลแอสซีเตตที่ภาวะเหนือวิกฤตในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ ซึ่งจะได้เอทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (Fatty Acid Ethyl Ester; FAEE) และไตรแอสซีติน (Triacetin) เป็นผลพลอยได้แทนกลีเซอรอล [10]



รูปที่ 2.4 ปฏิกริยาอินเทอร์เอสเทอร์ิฟิเคชัน [8]

ไตรแอสซีตินซึ่งเป็นผลพลอยได้จากปฏิกริยานี้สามารถใช้เป็นสารเติมแต่งเชื้อเพลิง (Fuel additive) ได้ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติการไหลเวียนในเชื้อเพลิงชีวภาพและเพิ่มประสิทธิภาพของเชื้อเพลิง เนื่องจากไตรแอสซีตินสามารถละลายได้ในเชื้อเพลิงชีวภาพซึ่งแตกต่างจากกลีเซอรอล ปฏิกริยานี้จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถหลีกเลี่ยงการผลิตกลีเซอรอล และลดต้นทุนการผลิตในขั้นการทำให้บริสุทธิ์หรือขั้นการแยกกลีเซอรอลของกระบวนการ [11]

สารตั้งต้นที่ใช้ทำปฏิกริยาอินเทอร์เอสเทอร์ิฟิเคชัน คือ คาร์บอกซิเลตเอสเทอร์ (Carboxylate ester) แทนการใช้แอลกอฮอล์ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน การใช้ของไหลภาวะเหนือวิกฤตแทนตัวเร่งปฏิกริยาสำหรับปฏิกริยาอินเทอร์เอสเทอร์ิฟิเคชันจะช่วยให้กระบวนการผลิตเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และมีผลพลอยได้เป็นไตรแอสซีตินแทนที่กลีเซอรอล

จากงานวิจัยของ Fadjar และคณะ [12] ศึกษาการใช้คาร์บอกซิเลตเอสเทอร์ชนิดต่างๆ เพื่อหาตัวทำละลายที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเรพซีด (Rapeseed oil) ในภาวะเหนือวิกฤต ดังแสดงในตารางที่ 2.2 จากผลการทดลองพบว่า เมทิลแอซีเตต (Methyl acetate) เป็นสารตั้งต้นที่สามารถให้ผลผลิตสูงสุดร้อยละ 97.7 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นผลผลิตที่รวมทั้งไบโอดีเซลและไตรแอซีตินเป็นผลิตภัณฑ์ อย่างไรก็ตาม เมทิลแอซีเตตยังคงเป็นตัวทำละลายที่เป็นอันตรายเมื่อเทียบกับเอทิลแอซีเตต เนื่องจากเอทิลแอซีเตตเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเอทานอล ซึ่งผลิตจากกระบวนการหมักชีวภาพ ทำให้ไบโอดีเซลที่ผลิตได้มาจากทรัพยากรหมุนเวียนอย่างแท้จริง เอทิลแอซีเตตจึงเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับตัวทำละลายในปฏิกิริยาอินเทอร์เอสเทอริฟิเคชัน เนื่องจากให้ผลผลิตสูงสุดรองลงมาจากเอทิลแอซีเตต

**ตารางที่ 2.2** หมู่คาร์บอกซิเลตเอสเทอร์ที่ใช้สำหรับการผลิตไบโอดีเซลในภาวะเหนือวิกฤต [12]

Carboxylate esters	Critical point		Reaction pressure at 350 °C (MPa)	Molar ratio of solvent to oil (vol. ratio)	Theoretical maximum (wt%)	
	( $T_c$ , °C)	( $P_c$ , MPa)			FAAE	Triacin
<i>Methyl carboxylates</i>						
Methyl acetate	234	4.6	17.8	42 (3.4)	100	25
Methyl propionate	258	4.0	15.4	42 (4.1)	100	29
Methyl butyrate	281	3.5	11.2	42 (4.9)	100	34
<i>Ethyl carboxylates</i>						
Ethyl acetate	250	3.9	16.3	42 (4.2)	100	23
Ethyl propionate	273	3.4	14.5	42 (4.9)	100	28
Ethyl butyrate	293	3.1	10.9	42 (5.7)	100	32
<i>Propyl carboxylates</i>						
Propyl acetate	276	3.2	14.2	42 (4.9)	100	22
Propyl propionate	305	3.0	10.4	42 (5.7)	100	27
Propyl butyrate	327	2.7	4.6	42 (6.4)	100	31
<i>Butyl carboxylates</i>						
Butyl acetate	306	3.1	9.2	42 (5.7)	100	22
Butyl propionate	322	2.8	7.4	42 (6.4)	100	26
Butyl butyrate	339	2.6	3.1	42 (7.1)	100	30

## 2.4 การสกัดน้ำมันกาแฟ [13]

วิธีการสกัดน้ำมันกาแฟจากกากกาแฟมีหลายวิธี เช่น การสกัดของแข็งด้วยของเหลว (Solid-Liquid Extraction) การสกัดด้วยตัวทำละลายร่วมกับคลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonic Extraction) การสกัดด้วยตัวทำละลายโดยวิธีวิทยาพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology) การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent Extraction) โดยในงานวิจัยนี้จะใช้การสกัดด้วยตัวทำละลายเอทิลแอซีเตต

### 2.4.1 การสกัดด้วยตัวทำละลาย

การสกัดด้วยตัวทำละลาย เป็นวิธีแยกสารที่เป็นของเหลวปนกับของเหลว หรือของแข็งปนของแข็ง โดยอาศัยสมบัติการละลายของสาร และเป็นการแยกสารที่ต้องการออกจากส่วนต่างๆของพืช หรือของผสม หลักการสำคัญของการสกัดด้วยตัวทำละลาย คือ การเลือกตัวทำละลายที่เหมาะสมในการสกัดสารที่ต้องการ ออกมาให้มากที่สุด เนื่องจากสารแต่ละชนิดจะละลายในตัวทำละลายต่างกันและละลายได้ปริมาณต่างกัน

### 2.4.2 หลักในการเลือกตัวทำละลายที่เหมาะสม

ตัวทำละลายที่เหมาะสมต้องละลายสารที่ต้องการสกัดได้ดีและไม่ละลายสารอื่นที่ไม่ต้องการหรือละลายได้น้อยมาก ไม่ทำปฏิกิริยากับสารที่ต้องการจะแยกและควรแยกออกจากสารละลายได้ง่าย ทำให้บริสุทธิ์ได้ง่าย เพื่อจะได้นำกลับมาใช้ใหม่ได้ นอกจากนี้ ควรมีราคาถูก หาได้ง่าย ไม่มีพิษ และมีจุดเดือดต่ำ [13]

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สาลินี และคณะ [14] ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟด้วยตัวทำละลายร่วมกับคลื่นเสียงความถี่สูงเพื่อเป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตไบโอดีเซล กากกาแฟเป็นวัสดุชีวมวลเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมการผลิตกาแฟสำเร็จรูปหรือจากร้านกาแฟสด ประกอบด้วยสารสำคัญหลายชนิด ได้แก่ โพลีแซคคาไรด์ โปรตีน ไขมัน คาเฟอีน สารประกอบฟีนอลและแร่ธาตุต่างๆ ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตเป็นพลังงานชีวภาพได้ งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟด้วยตัวทำละลายร่วมกับคลื่นเสียงความถี่สูง (50/60 เฮิร์ตซ์) และตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีบางประการของน้ำมันที่สกัดได้เพื่อใช้เป็นแหล่งวัตถุดิบสำหรับการผลิตไบโอดีเซล โดยศึกษาชนิดของตัวทำละลาย (เฮกเซน คลอโรฟอร์ม เอทานอลและเมทานอล) อัตราส่วนโดยมวลต่อปริมาตรระหว่างกากกาแฟต่อตัวทำละลาย (1:1 1:2 1:3 1:4 และ 1:5) ระยะเวลา (15 30 45 และ 60 นาที) และอุณหภูมิที่เหมาะสมในการสกัด (30 40 และ 50 องศาเซลเซียส) ผลจากการศึกษาพบว่าภาวะที่เหมาะสมต่อการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟ คือ เฮกเซนที่อัตราส่วนระหว่างกากกาแฟต่อตัวทำละลาย 1:5 ระยะเวลา 15 นาที อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ให้ปริมาณน้ำมันที่สกัดได้สูงสุดร้อยละ 9.47 โดยน้ำหนักแห้ง และน้ำมันที่สกัดได้มีความหนืด 51.20 ตารางมิลลิเมตรต่อวินาที ความหนาแน่น 0.9420 กิโลกรัมต่อลิตร และกรดไขมันอิสระร้อยละ 3.28 น้ำมันจากกากกาแฟมีสมบัติเพียงพอและน่าจะนำไปใช้เป็นแหล่งวัตถุดิบสำหรับการผลิตไบโอดีเซลได้

Sanjib [15] ศึกษาโรงกลั่นชีวภาพที่ใช้กากกาแฟสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ พอลิเมอร์ สารต้านอนุมูลอิสระ และไบโอดีเซล กากกาแฟประกอบด้วย ลิพิด คาร์โบไฮเดรต คาร์บอนาเซียส และไนโตรเจนที่มีสารประกอบอื่นๆ การใช้เฮกเซนและเฮกเซน/ไอโซโพรพานอลได้ปริมาณน้ำมันกาแฟสูงสุดโดยใช้การสกัดแบบซอกซ์เลต (Soxhlet Extraction) คาร์บอนไดออกไซด์ภาวะวิกฤต (Supercritical carbon dioxide) สามารถใช้เป็นตัวทำละลายสำหรับการสกัดน้ำมัน การใช้วิธีการทางเคมีและเทคโนโลยีชีวภาพขั้นสูง กากกาแฟที่ใช้แล้วจะถูกเปลี่ยนเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพต่างๆ เช่น ไบโอดีเซล น้ำมันดีเซลหมุนเวียน เอทานอลชีวภาพ อีเทอร์ชีวภาพ น้ำมันชีวภาพ ถ่านชีวภาพ และก๊าซชีวภาพ ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของกากกาแฟ 4 กิโลกรัม ได้ผลผลิตไบโอดีเซลร้อยละ 80–83 นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่มและหลากหลาย ได้แก่ พอลิไฮดรอกซีแอลคาโนเอต (Polyhydroxyalkanoates) สารดูดซับชีวภาพ (Biosorbent) ถ่านกัมมันต์ พอลิแอลกอฮอล์ โพลีเอทิลีน เทเรฟทาเลต สารต้านอนุมูลอิสระฟีนอลิก และคอมโพสิตรัศมีสิ่งแวดล้อมซึ่งได้มาจากกากกาแฟ หลักการของเศรษฐกิจหมุนเวียนถูกนำไปใช้ในการพัฒนาโรงกลั่นชีวภาพแบบยั่งยืนโดยอาศัยการประเมินมูลค่าของกากกาแฟ

โชคชัย และคณะ [16] ศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการใช้น้ำมันที่สกัดได้จากกากกาแฟเป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตไบโอดีเซล วัตถุดิบที่นิยมนำมาใช้ในการผลิตไบโอดีเซลได้แก่ น้ำมันปาล์ม ซึ่งเป็นน้ำมันที่ใช้สำหรับการบริโภค การจะนำมาใช้ผลิตเป็นพลังงานในปริมาณมากอาจส่งผลให้เกิดการขาดแคลนในแง่ของการบริโภคได้ อีกทั้งยังส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้นด้วย ดังนั้น การหาวัตถุดิบใหม่เพื่อใช้ในการผลิตไบโอดีเซลจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ งานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายที่จะหาแหล่งวัตถุดิบอื่นๆ ซึ่งสามารถนำมาใช้แทนน้ำมันปาล์มได้ โดยกากกาแฟเป็นตัวเลือกที่มีความเป็นไปได้ในการที่จะนำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตเชื้อเพลิง เนื่องจากผลการทดลองเบื้องต้นในการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟพบว่า กากกาแฟมีปริมาณน้ำมันและกรดไขมันอิสระประมาณร้อยละ 12.2 และ 16.5 โดยน้ำหนัก อีกทั้งเมื่อศึกษาผลของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้เมทานอลเป็นตัวทำปฏิกิริยาและมีกรดซัลฟูริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าสามารถลดปริมาณกรดไขมันอิสระได้ถึงร้อยละ 85 และสามารถผลิตเมทิลเอสเทอร์ได้ถึงร้อยละ 90.20 ด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ดังนั้น น้ำมันที่สกัดได้จากกากกาแฟจึงมีศักยภาพในการที่จะใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตไบโอดีเซล

Kok และคณะ [17] ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลในของไหลภาวะเหนือวิกฤต กรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ (Fatty Acid Methyl Ester; FAME) หรือที่รู้จักกันทั่วไปว่าไบโอดีเซลเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งมีประสิทธิภาพมากกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลที่ใช้แล้วหมดไปในแง่ของความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ การปล่อยคาร์บอนและปริมาณกำมะถัน การผลิตไบโอดีเซลในปัจจุบันไม่น่าสนใจด้วยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไวต่อสารปนเปื้อนที่พบในน้ำมัน เช่น กรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acid; FFA) และน้ำ นอกจากนี้ยังต้องใช้กระบวนการที่ซับซ้อน ดังนั้น เทคโนโลยีของไหลภาวะเหนือวิกฤตที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจึงเป็นอีกทางเลือก



หนึ่งที่น่าสนใจ งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาปฏิกิริยาของของไหลภาวะเหนือวิกฤตในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ได้แก่ เมทานอล เมทิลแอสีเตต และไดเมทิลคาร์บอเนตภาวะเหนือวิกฤต นอกจากนี้ยังมีการทดสอบความเสถียรของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ในภาวะเหนือวิกฤต ผลของปริมาณกรดไขมันอิสระ น้ำ และตัวทำละลายร่วม (Co-solvent) ในปฏิกิริยาอีกด้วย

### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

##### 3.1.1 อุปกรณ์

- เครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ (Batch tube reactor) ขนาด 4.5 มิลลิลิตร ทำจาก Stainless steel
- บ่อทรายฟลูอิดाइซ์ (Fluidized sand bath; OMEGA Model FSB-3, USA)
- เครื่องชั่งดิจิตอล 4 ตำแหน่ง (Analytical Balance)
- แก๊สโครมาโทกราฟี (Agilent technology, model 6890N)

##### 3.1.2 สารเคมี

- กาแฟกาแฟคว้ง (Coffea arabica L.) จากร้านสตาร์บัคส์ สยามสแควร์วัน กรุงเทพฯ
- เอทิลแอสีเตต (Ethyl acetate): Analytical grade 99.8% จาก RCL Labscan Ltd, Thailand
- เฮปเทน (n-Heptane): Analytical grade 99.5% จาก Fisher Scientific
- เอทิลปาล์มมิเตต (Ethyl palmitate): Analytical grade ≥99% จาก Sigma Aldrich
- เอทิลโอลิเอต (Ethyl oleate): Analytical grade 98% จาก Sigma Aldrich

#### 3.2 รายละเอียดวิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันกาแฟผ่านปฏิกิริยาอินเทอร์เอสเทอริฟิเคชัน ด้วยเอทิลแอสีเตต ภาวะเหนือวิกฤตในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ โดยศึกษาผลของอุณหภูมิในช่วง 300-375 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยาตั้งแต่ 20-40 นาที ภายใต้ความดัน 15 เมกะพาสคัล ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

##### 3.2.1 การเตรียมกาแฟ

กาแฟคว้งเข้มจากร้านสตาร์บัคส์ สยามสแควร์วัน กรุงเทพฯ ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 กาแฟคั่วเข้ม

### 3.2.2 ปริมาณความชื้นในกาแฟ

หลังจากได้กาแฟ จะนำกาแฟปริมาณ 10 กรัม มาเป็นสารตัวอย่างเพื่อหาปริมาณความชื้นในกาแฟ นำสารตัวอย่างวางบนที่เก็บที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 72 ชั่วโมงเพื่อเอาน้ำที่อยู่บนผิวนอกของสารตัวอย่างระเหยออก จากนั้น น้ำที่ผิวด้านในของสารตัวอย่างพิจารณาโดยแบ่งสารตัวอย่างเป็น 3 ส่วน (6-8 กรัม) เพื่อทำการทดลอง 3 ซ้ำ ชั่งน้ำหนักสารตัวอย่างก่อนเข้าเครื่องอบ จากนั้นนำเข้าเครื่องอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำสารตัวอย่างแห้ง (ผ่านการอบ) ชั่งน้ำหนักอีกรอบเพื่อหาปริมาณน้ำที่หายไป จะได้ปริมาณน้ำที่อยู่ในสารตัวอย่าง [18]

### 3.2.3 ปริมาณน้ำมันในกาแฟ

การหาปริมาณน้ำมันกาแฟที่สูงที่สุดโดยการสกัดด้วยวิธีซอกซ์ເລຕ ซึ่งใช้เอทิลแอลกอฮอล์เป็นตัวทำละลาย เริ่มจากการใช้ตัวอย่างกาแฟแห้งปริมาณ 20 กรัม ใส่ตัวอย่างลงในตัวกรองเซลลูโลส (Cellulose extraction thimble) และวางลงในที่เก็บสารของชุดสกัดซอกซ์ເລຕ จากนั้นใส่ตัวทำละลายเอทิลแอลกอฮอล์ ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ลงในขวดกั่นกลม และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เพื่อสกัดน้ำมันกาแฟเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ซึ่งเป็นเวลาที่เพียงพอที่จะทำให้สีของตัวกรองเซลลูโลสกลับมาเป็นสีขาว [18]

### 3.2.4 การสกัดน้ำมันจากกาแฟด้วยเอทิลแอลกอฮอล์

ในงานวิจัยนี้หาปริมาณน้ำมันกาแฟโดยการสกัดแบบแช่โดยใช้เอทิลแอลกอฮอล์เป็นตัวทำละลาย เริ่มจากนำกาแฟแห้ง (ผ่านการอบ) 500 กรัม ผสมกับเอทิลแอลกอฮอล์ 2 ลิตร ตั้งทิ้งไว้บนเครื่องกวนสาร 24 ชั่วโมง จากนั้นสารจะแยกเป็น 2 ชั้น ชั้นบนเป็นสารผสมระหว่างน้ำมันกาแฟกับตัวทำละลายเอทิลแอลกอฮอล์ ชั้นล่างจะเป็นกาแฟ นำสารผสมชั้นบนออกมาส่วนหนึ่งเพื่อนำไปหาปริมาณน้ำมันกาแฟ จากนั้นนำสารที่แยกเป็น 2 ชั้นมากรองเพื่อแยกกาแฟออกจากสารผสมน้ำมันกาแฟกับเอทิลแอลกอฮอล์ แสดงดังรูปที่ 3.2 [18]



รูปที่ 3.2 น้ำมันกาแฟจากกากาแฟคั่วบด

### 3.2.5 องค์ประกอบในน้ำมันกาแฟโดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์ (Gas Chromatograph - Mass Spectrometer; GC-MS)

นำน้ำมันกาแฟที่ได้หลังจากการสกัดด้วยวิธีซอกซ์เลตมาระเหยเอทิลแอลกอฮอล์ส่วนเกินออกโดยการไล่ด้วยไนโตรเจน (Nitrogen stripping) จากนั้น ใช้เฮปแทนเป็นตัวทำละลายเพื่อเจือจางน้ำมันกาแฟ ความเข้มข้นของตัวอย่างจะตั้งไว้ที่ 500 ส่วนในล้านส่วน (500 ppm) สำหรับการวิเคราะห์โดยแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์ ภาวะของแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์แสดงดังตารางที่ 3.1 [18]

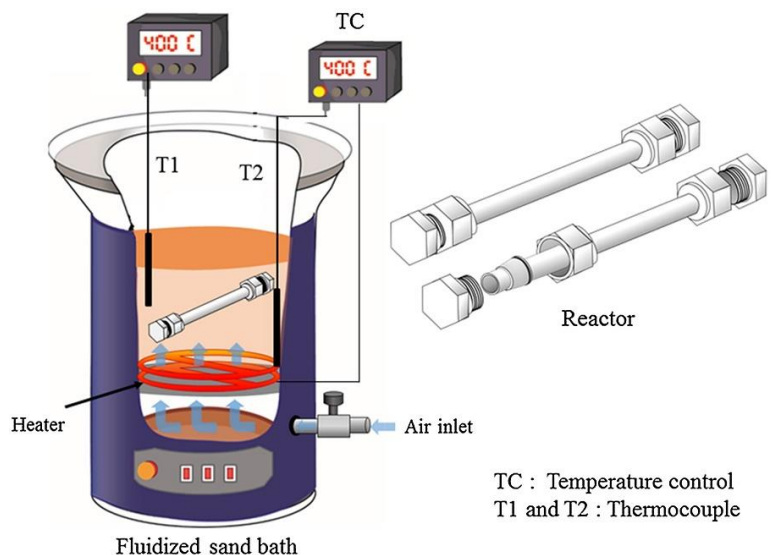
ตารางที่ 3.1 ภาวะของแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์สำหรับการวิเคราะห์หาองค์ประกอบในน้ำมันกาแฟ

ภาวะ	ค่า
ช่วงการสแกนมวลโมเลกุล (Molecular weight scan range)	50-500 มวลต่อประจุ
อุณหภูมิของตัวตรวจวัด (Detector temperature)	280 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิเริ่มต้นของเตาอบ (Oven initial temperature)	150 องศาเซลเซียส (ค้าง 3 นาที)
อัตราการให้ความร้อนของเตาอบ (Oven heating rate)	2 องศาเซลเซียสต่อนาที
อุณหภูมิสุดท้ายของเตาอบ (Oven final temperature)	250 องศาเซลเซียส (ค้าง 5 นาที)
อุณหภูมิส่วนฉีด (Injection part temperature)	250 องศาเซลเซียส

### 3.2.6 การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันกาแฟในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์

นำสารผสมน้ำมันกาแฟ-เอทิลแอลกอฮอล์ที่สกัดได้บรรจุลงในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ ทำการปรับอุณหภูมิของบ่อทรายฟลูอิดซ์และเปิดแอร์ปั๊ม (Air pump) ให้อากาศเข้ามาภายในเพื่อถ่ายเทความร้อนให้กับทราย เมื่ออุณหภูมิถึงค่าที่ต้องการจึงนำเครื่องปฏิกรณ์บรรจุในบ่อทรายฟลูอิดซ์เพื่อให้ความร้อน แสดงดังรูปที่ 3.3 และเริ่มจับเวลา เมื่อครบเวลาที่กำหนด นำเครื่องปฏิกรณ์แช่ในน้ำเย็นและทำให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไประเหยเอทิลแอลกอฮอล์โดยการไล่ด้วยไนโตรเจน เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณเอทิลเอสเทอร์ต่อไป

ในงานวิจัยนี้ศึกษาผลได้การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันกาแฟที่อุณหภูมิ 300, 325, 350 และ 375 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 20, 30 และ 40 นาที ตามลำดับ ภายใต้ความดัน 15 เมกะพาสคัล



รูปที่ 3.3 เครื่องมือการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันกาแฟด้วยเอทิลแอลกอฮอล์สถานะเหนือวิกฤต

บ่อทรายฟลูอิดซ์ให้ความร้อนโดยอุปกรณ์ให้ความร้อนด้วยไฟฟ้า (Electrical heaters) และวัดอุณหภูมิของระบบด้วยเทอร์โมคัปเปิล (K-type thermocouples; VSC Advance Co., Ltd, Thailand) เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller) จะใช้ในการควบคุมอุณหภูมิภายในบ่อทรายฟลูอิดซ์

### 3.2.7 การวิเคราะห์หาปริมาณเอทิลเอสเทอร์ของไบโอดีเซลด้วยแก๊สโครมาโทกราฟี

สารตัวอย่างจากแต่ละภาวะการทำปฏิกิริยาจะถูกวิเคราะห์ด้วยแก๊สโครมาโทกราฟี โดยใช้เอทิลปาล์มมิเตตและเอทิลโอเลียด 0.625 ถึง 1 กรัม เจือจางในเฮปเทน เพื่อสร้างกราฟมาตรฐานแบบใช้สารมาตรฐานภายนอก (External standard calibration curve) แก๊สโครมาโทกราฟีจะใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณของกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ในสารตัวอย่าง ซึ่งประกอบด้วยแคปิลลารีคอลัมน์ (Capillary column; DB-FATWAX, ยาว 30 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 0.25 มิลลิเมตร) และตัวตรวจวัดเปลวไอออไนเซชัน (Flame Ionization Detector; FID) ภาวะของแก๊สโครมาโทกราฟีแสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ภาวะของแก๊สโครมาโทกราฟีสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณของกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์

ภาวะ	ค่า
อัตราการไหลของแก๊สตัวพา (ฮีเลียม; He)	1.3 มิลลิลิตรต่อนาที
อุณหภูมิของตัวตรวจวัด	280 องศาเซลเซียส
อัตราการแบ่งส่วน (Split ratio)	1: 25
อุณหภูมิส่วนฉีด	260 องศาเซลเซียส
ปริมาตรการฉีด (Inject volume)	1 ไมโครลิตร

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 ลักษณะของน้ำมันกาแฟ

จากงานวิจัยของ Wirasinee และคณะ [18] ได้นำตัวอย่างกากกาแฟบางส่วนมาทดลองเพื่อหาลักษณะต่างๆ ได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณน้ำมันในกากกาแฟที่สามารถสกัดได้ และองค์ประกอบในน้ำมันกาแฟ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

##### 4.1.1 ปริมาณความชื้นในกากกาแฟ

จากการกำจัดน้ำในกากกาแฟออกโดยการทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 72 ชั่วโมง เพื่อป้องกันการเกิดแบคทีเรียและเชื้อรา พบว่ามีปริมาณความชื้นในตัวอย่างกากกาแฟเฉลี่ยร้อยละ 56 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นความชื้นที่สูงเหมาะสำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียและเชื้อรา ดังนั้น ขั้นตอนการตากแห้งจึงจำเป็นเพื่อขจัดน้ำที่อยู่บนผิวนอกออก เพื่อป้องกันการย่อยสลายของน้ำมันกาแฟโดยจุลินทรีย์ และยืดอายุการเก็บรักษากากกาแฟ

จากการนำกากกาแฟเข้าเครื่องอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดน้ำที่ผิวด้านในออก พบว่าปริมาณความชื้นในตัวอย่างกากกาแฟเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 12.76 โดยน้ำหนัก จะเห็นว่าปริมาณความชื้นด้านในผิวของกากกาแฟต่ำกว่าร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ซึ่งส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาอินเทอร์เอสเทอร์ฟิเคชันน้อยมาก เนื่องจากปฏิกิริยาอินเทอร์เอสเทอร์ฟิเคชันมีลักษณะคล้ายกับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน เมื่อวัตถุดิบที่ใช้มีน้ำปริมาณมากอาจทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีค่าความเป็นกรดสูง

##### 4.1.2 ปริมาณน้ำมันในกากกาแฟ

จากการใช้ตัวอย่างกากกาแฟคั่วปริมาณ 20 กรัม เพื่อหาปริมาณน้ำมันกาแฟที่สกัดได้โดยใช้เอทิลแอลซีเตตเป็นตัวทำละลาย พบว่าหลังจากสกัดเป็นเวลา 6 ชั่วโมง มีปริมาณน้ำมันกาแฟร้อยละ 22.74 โดยน้ำหนัก ซึ่งปริมาณน้ำมันกาแฟขึ้นอยู่กับตัวทำละลายที่ใช้ เฮกเซนเป็นตัวทำละลายที่นิยมใช้สำหรับการสกัดในงานวิจัยจำนวนมาก แต่เมื่อสกัดด้วยวิธีซอกซ์เลตสามารถสกัดน้ำมันกาแฟได้มากที่สุดร้อยละ 12.5 โดยน้ำหนัก ดังนั้นพบว่าในงานวิจัยนี้ การสกัดโดยใช้เอทิลแอลซีเตตเป็นตัวทำละลายเหมาะสมกว่าการใช้เฮกเซนเป็นตัวทำละลาย

### 4.1.3 น้ำมันกาแฟจากการสกัดด้วยเอทิลแอลกอฮอล์

จากการใช้ตัวอย่างกากกาแฟคั่ว 500 กรัม ผสมกับตัวทำละลายเอทิลแอลกอฮอล์ 2 ลิตร เพื่อหาปริมาณน้ำมันกาแฟที่สกัดได้ พบว่าหลังจากตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง มีปริมาณน้ำมันกาแฟร้อยละ 20.74 โดยน้ำหนัก คิดเป็นร้อยละ 91.20 เมื่อเทียบกับการสกัดด้วยวิธีซอกซ์เลตซึ่งให้ปริมาณน้ำมันกาแฟมากที่สุด ร้อยละ 22.74 โดยมีมวล

### 4.1.4 องค์ประกอบในน้ำมันกาแฟ

การพิจารณาองค์ประกอบในน้ำมันกาแฟโดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ-แมสสเปกโตรมิเตอร์ พบว่ามีองค์ประกอบทางเคมีจำนวนมาก องค์ประกอบที่สำคัญในน้ำมันกาแฟ ได้แก่ กรดปาล์มิติก และ กรดลิโนลินิก จึงสามารถนำน้ำมันกาแฟมาเป็นสารตั้งต้นในการผลิตไบโอดีเซลได้

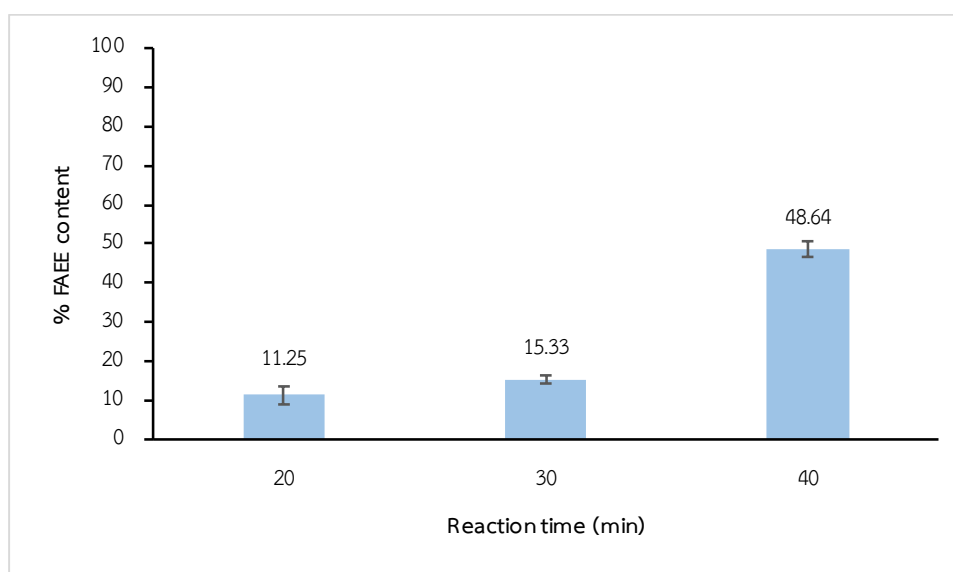
## 4.2 ผลของอุณหภูมิและเวลาในการผลิตไบโอดีเซลจากกากกาแฟคั่ว

สารผสมตั้งต้นในการผลิตไบโอดีเซลคือเอทิลแอลกอฮอล์และน้ำมันกาแฟ ทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ ภาวะที่ดีที่สุดคือได้ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์มากที่สุด

เนื่องจากอุณหภูมิเป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ ในงานวิจัยนี้จึงศึกษาที่อุณหภูมิเหนือจุดวิกฤตของเอทิลแอลกอฮอล์ (250 องศาเซลเซียส) โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 300 325 350 และ 375 องศาเซลเซียส ที่เวลา 20 30 และ 40 นาที และที่ความดันคงที่ 15 เมกะพาสคัล ผลการทดลองแสดงดังรูปที่

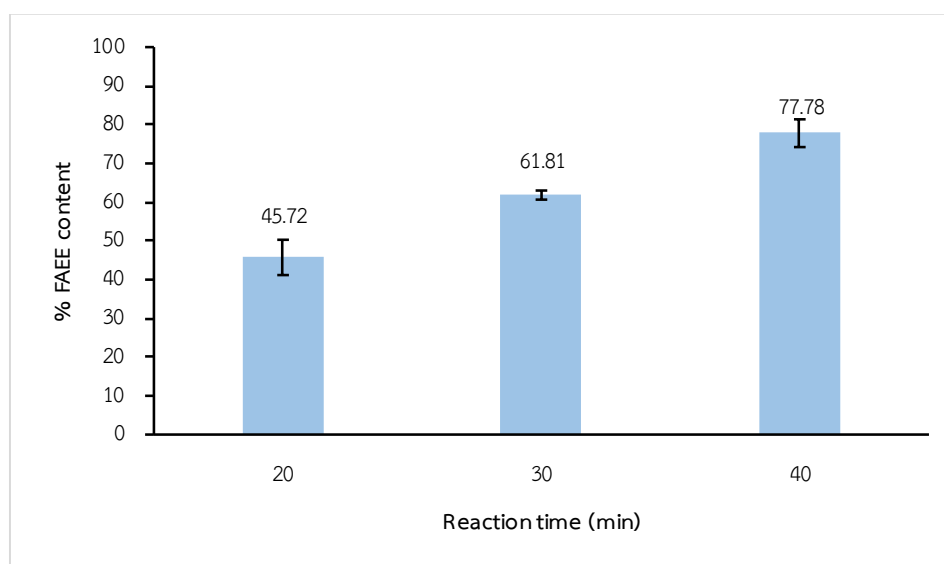
4.1 4.2 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ





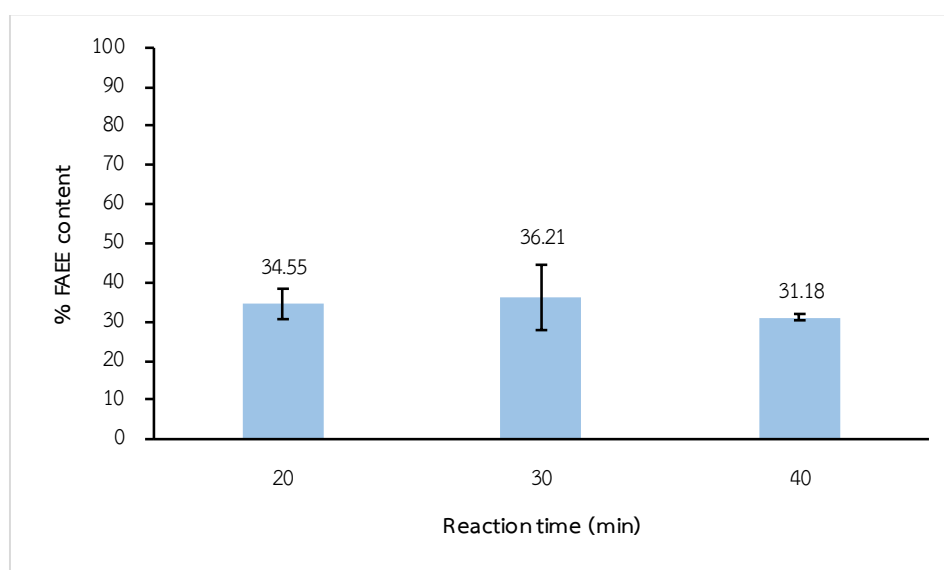
รูปที่ 4.1 ร้อยละผลได้ของกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ที่ความดัน 15 เมกะพาสคัล และอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ที่เวลา 20-40 นาที

จากรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ที่เวลา 20 30 และ 40 นาที ได้ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ร้อยละ 11.25 15.33 และ 48.64 ตามลำดับ ซึ่งหมายถึงเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยามากขึ้น เกิดปฏิกิริยาได้มากขึ้น ดังนั้นที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ได้ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์มากที่สุดร้อยละ 48.64 ที่เวลา 40 นาที



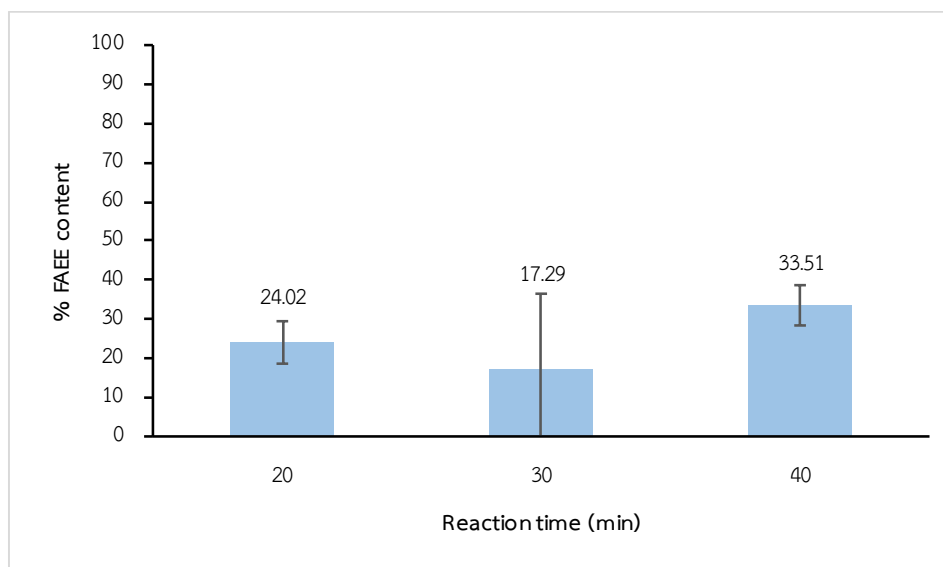
รูปที่ 4.2 ร้อยละผลได้ของกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ที่ความดัน 15 เมกะพาสคัล และอุณหภูมิ 325 องศาเซลเซียส ที่เวลา 20-40 นาที

จากรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 325 องศาเซลเซียส ที่เวลา 20 30 และ 40 นาที ได้ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ร้อยละ 45.72 61.81 และ 77.78 ตามลำดับ ซึ่งหมายถึงเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดปฏิกิริยาได้มากขึ้น และมีแนวโน้มที่ดีขึ้นกว่าเมื่อเทียบกับที่ 300 องศาเซลเซียส เนื่องจากอินเทอร์เอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน การเพิ่มอุณหภูมิทำให้จลนศาสตร์ของปฏิกิริยาเร็วขึ้น ส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นที่อุณหภูมิ 325 องศาเซลเซียส ได้ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์มากที่สุด ร้อยละ 77.78 ที่เวลา 40 นาที



รูปที่ 4.3 ร้อยละผลได้ของกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ที่ความดัน 15 เมกะพาสคัล และอุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ที่เวลา 20-40 นาที

จากรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ที่เวลา 20 30 และ 40 นาที ได้ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ร้อยละ 34.55 36.21 และ 31.18 ตามลำดับ พบว่าเมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาที ร้อยละผลได้ของกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานานเกินไปจนส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เกิดการสลายตัวด้วยความร้อน (Thermal decomposition)



รูปที่ 4.4 ร้อยละผลได้ของกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ที่ความดัน 15 เมกะพาสคัล และอุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียส ที่เวลา 20-40 นาที

จากรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียส ที่เวลา 20 30 และ 40 นาที ได้ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ร้อยละ 24.02 17.29 และ 33.51 ตามลำดับ พบว่าเมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ร้อยละผลได้ของกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานานเกินไปจนส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เกิดการสลายตัวด้วยความร้อนและแตกตัวเป็นสายโซ่คาร์บอนที่สั้นลง

จากนั้นได้นำอุณหภูมิที่ได้ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ที่มากที่สุดและมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้น ซึ่งคือที่อุณหภูมิ 300 และ 325 องศาเซลเซียส มาทำการทดลองต่อโดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 40 50 และ 60 นาที ที่ความดันคงที่ 15 เมกะพาสคัล ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ



รูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 325 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้นที่ 50 และ 60 นาที ได้ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ร้อยละ 91.80 และ 88.54 ตามลำดับ พบว่าเมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 50 นาที ร้อยละผลได้ของกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารสามารถสัมผัสกับตัวทำละลายได้นานขึ้นเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาได้มากขึ้น และเมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ร้อยละผลได้ของกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์มีแนวโน้มลดลง ซึ่งเกิดจากการสลายตัวด้วยความร้อนและการแตกตัวของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์เป็นสายโซ่คาร์บอนที่สั้นลง

ดังนั้นจากการทดลองเพื่อให้ได้ร้อยละผลได้ของกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์สูงสุด อุณหภูมิ 325 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 50 นาที จึงเป็นภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากกากกาแฟ

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะในงานวิจัย

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

การผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากกากกาแฟด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ ตัวแปรอุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยาส่งผลต่อร้อยละผลได้ของกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์ พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยา ทำให้ร้อยละผลได้ของกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้น แต่การใช้ อุณหภูมิสูงและเวลานานเกินไปส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เกิดการสลายตัวด้วยความร้อนและแตกตัวเป็นสายโซ่คาร์บอนที่ สั้นลง ทำให้ร้อยละผลได้ของกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ลดลง ซึ่งภาวะที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้คือ การทำ ปฏิกิริยาที่ความดัน 15 เมกะพาสคัล อุณหภูมิ 325 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 50 นาที ซึ่งจะให้ ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์สูงสุดที่ร้อยละ 91.80 โดยน้ำหนัก

การทำปฏิกิริยาอินเทอร์เอสเทอริฟิเคชันแทนการทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันสามารถลดการเกิด กลีเซอรอลซึ่งเป็นของเสียปริมาณมากในปัจจุบัน และไตรเอซีดีนเป็นผลพลอยได้ของปฏิกิริยานี้ เอทิลปาล์มมิเตต และเอทิลลิโนเลตในผลิตภัณฑ์สามารถพิสูจน์ได้ว่าน้ำมันกาแฟเหมาะสมสำหรับเป็นวัตถุดิบในการผลิตเชื้อเพลิง ชีวภาพโดยใช้เอทิลแอลกอฮอล์ในภาวะเหนือวิกฤต

#### 5.2 ข้อเสนอแนะในงานวิจัย

การเพิ่มตัวทำละลายร่วม เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ ในการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากกากกาแฟด้วยเอทิล แอลกอฮอล์ในภาวะเหนือวิกฤต จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการได้ โดยการเร่งการเกิดภาวะเหนือวิกฤตให้ เสร็จในเวลาอันสั้นที่อุณหภูมิต่ำลงและได้ผลผลิตไบโอดีเซลที่สูงขึ้น ปริมาณของน้ำมันกาแฟจะขึ้นกับวิธีการสกัด หรือชนิดของตัวทำละลาย กระบวนการที่สามารถให้ปริมาณน้ำมันกาแฟสูงสุดแต่ลดการใช้พลังงาน ระหว่าง กระบวนการ ถือเป็นเป้าหมายสูงสุดในการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากกากกาแฟ นอกจากนี้ ควรมีการศึกษาผลของ ปัจจัยอื่นๆ เช่น สายพันธุ์ของเมล็ดกาแฟ ระดับการคั่ว และวิธีการชง เพื่อเปรียบเทียบร้อยละผลได้ของกรดไขมัน เอทิลเอสเทอร์ที่ได้จากวัตถุดิบที่แตกต่างกัน

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

## การคำนวณหาน้ำหนักของน้ำมันกาแพที่ใช้ทำปฏิกิริยา

## และกราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ไบโอดีเซลด้วยแก๊สโครมาโทกราฟี

## ก.1 การคำนวณหาน้ำหนักของสารละลายน้ำมันกาแพในเอทิลแอสีเตตที่ใช้ทำปฏิกิริยา

น้ำหนักของสารละลายน้ำมันกาแพในเอทิลแอสีเตตที่ใช้ทำปฏิกิริยาสำหรับแต่ละอุณหภูมิสามารถหาได้จากสมการสถานะ (Equation of state) ของเพง-โรบินสัน (Peng-Robinson) แสดงดังรูปที่ ก.1 และตารางที่ ก.1

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a\alpha}{V(V+b)+b(V-b)}$$

$$a = 0.45724 \frac{R^2 T_c^2}{P_c} \quad \text{และ} \quad b = 0.07780 \frac{RT_c}{P_c}$$

$$\alpha = [1 + S(1 - \sqrt{T_r})]^2$$

$$S = 0.37464 + 1.5422\omega - 0.26992\omega^2$$

## รูปที่ ก.1 สมการสถานะของเพง-โรบินสัน

โดย	P	คือ ความดันในการทำปฏิกิริยา เท่ากับ 15,000 (กิโลพาสคัล)
	T	คือ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (เคลวิน)
	V	คือ ปริมาตรโมลาร์ (ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลโมล)
	R	คือ ค่าคงที่ของแก๊ส เท่ากับ 8.314 (กิโลพาสคัล·ลูกบาศก์เมตร/กิโลโมล·เคลวิน)
	$P_c$	คือ ความดันวิกฤตของเอทิลแอสีเตต เท่ากับ 3,830 (กิโลพาสคัล)
	$T_c$	คือ อุณหภูมิวิกฤตของเอทิลแอสีเตต เท่ากับ 523.3 (เคลวิน)

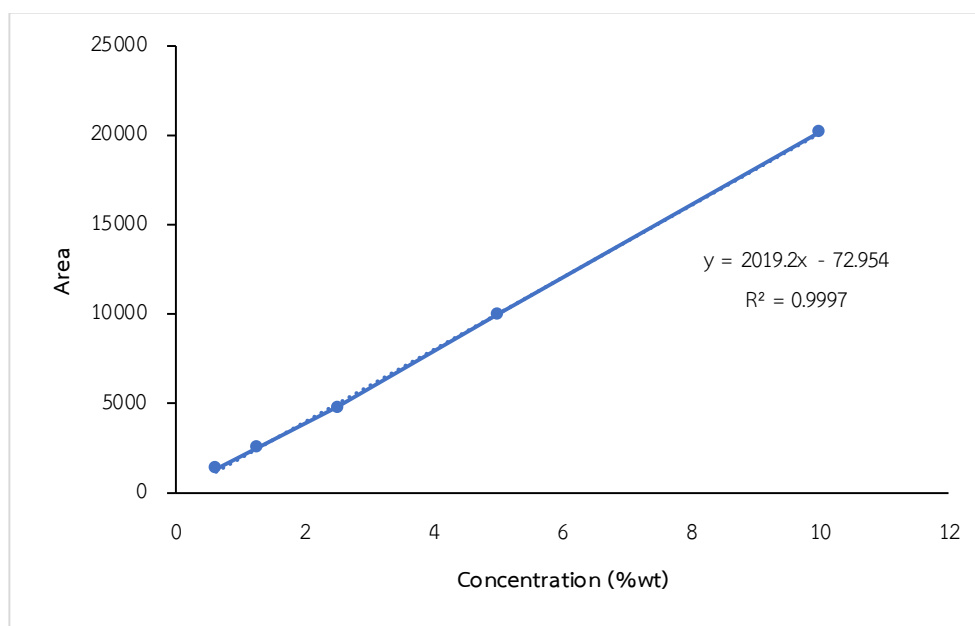
ตารางที่ ก.1 น้ำหนักของสารละลายน้ำมันกาแพในเอทิลแอสีเตตสำหรับแต่ละอุณหภูมิในการผลิตไบโอดีเซล

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	น้ำหนัก (กรัม)
300	2.19
325	1.97
350	1.77
375	1.59

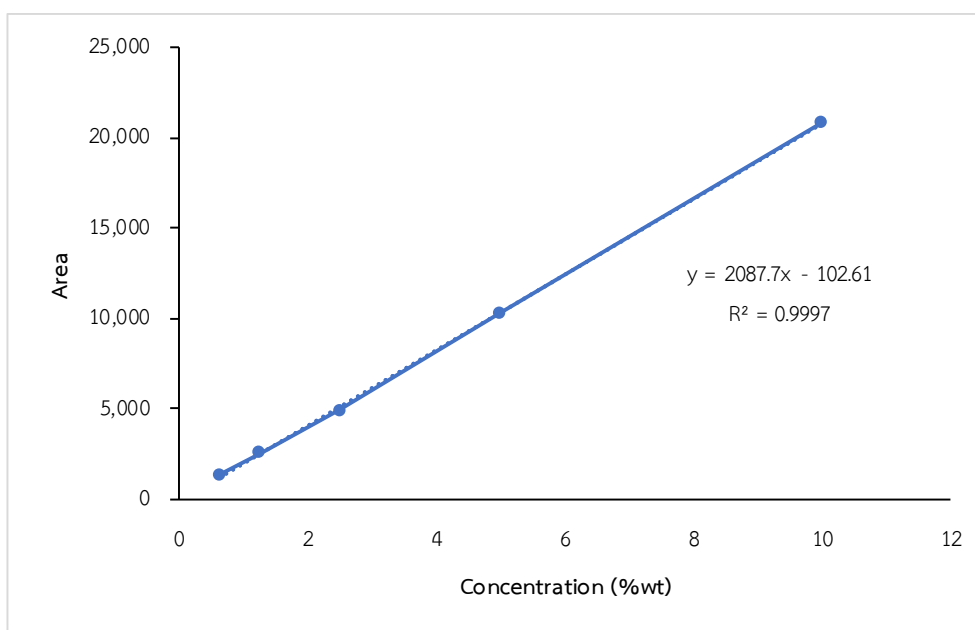


## ก.2 กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ไบโอดีเซลด้วยแก๊สโครมาโทกราฟี

เอทิลปาล์มมีเตตและเอทิลโอเลเตตจะใช้เป็นสารมาตรฐานภายนอกในการคำนวณหาปริมาณของกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์ โดยมีช่วงของความเข้มข้นร้อยละ 0.625 ถึง 10 โดยน้ำหนัก กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ไบโอดีเซลด้วยแก๊สโครมาโทกราฟีแสดงดังรูปที่ ก.2 และ ก.3



รูปที่ ก.2 กราฟมาตรฐานของเอทิลปาล์มมีเตต



รูปที่ ก.3 กราฟมาตรฐานของเอทิลเอทิลโอเลเตต

### บรรณานุกรม

- [1] วิกีพีเดีย สารานุกรมเสรี. (2563). ไบโอดีเซล. ค้นเมื่อ 21 ธันวาคม 2563, จาก:  
<https://th.wikipedia.org/wiki/ไบโอดีเซล>
- [2] Abdullah, M. and Koc, A. B. (2013). Oil removal from waste coffee grounds using two-phase solvent extraction enhanced with ultrasonication. *Renewable Energy*. 50, 965-970.
- [3] Food Network Solution. Supercritical fluid extraction. ค้นเมื่อ 21 ธันวาคม 2563, จาก:  
<http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0980/supercritical-fluid-extraction>
- [4] วิกีพีเดีย สารานุกรมเสรี. (2563). กาแฟ. ค้นเมื่อ 21 ธันวาคม 2563, จาก:  
<https://th.wikipedia.org/wiki/กาแฟ>
- [5] กรมพัฒนาธุรกิจการค้า. (2562). ธุรกิจผลิตกาแฟ. ค้นเมื่อ 21 ธันวาคม 2563, จาก:  
[https://www.dbd.go.th/download/document\\_file/Statistic/2562/T26/T26\\_201901.pdf](https://www.dbd.go.th/download/document_file/Statistic/2562/T26/T26_201901.pdf)
- [6] บทที่ 2 การทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง. ค้นเมื่อ 23 ธันวาคม 2563, จาก:  
[http://www.research-system.siam.edu/images/coop\\_HT/2-60/Coffee\\_Aroma\\_Candle/07\\_ch2.pdf](http://www.research-system.siam.edu/images/coop_HT/2-60/Coffee_Aroma_Candle/07_ch2.pdf)
- [7] สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2562). บทความ: กากกาแฟ จากแก้วกาแฟสู่แนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียนสำหรับผลิตภัณฑ์ชีวภาพ. ค้นเมื่อ 23 ธันวาคม 2563, จาก:  
<http://www.ej.eric.chula.ac.th/content/6109/66>
- [8] ฐานข้อมูลส่งเสริมและยกระดับคุณภาพสินค้าOTOP. (2021). เทคโนโลยีและกระบวนการผลิตไบโอดีเซล. ค้นเมื่อ 23 มกราคม 2564, จาก:  
<http://www.sptn.dss.go.th/otopinfo/index.php/en/knowledge/informationrepack/389-technology-and-biodiesel-production>
- [9] Yasuji, T., Takeuchi, H., Kawashima, Y. (2008). Particle design of poorly water-soluble drug substances using supercritical fluid technologies. *Advanced Drug Delivery Reviews*. 60, 388-398.

- [10] นันทนา สุตรเชี่ยวชาญ. (2021). การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและน้ำมันปาล์มโดยใช้เอทิลแอลกอฮอล์ที่ภาวะเหนือวิกฤตในเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร. ค้นเมื่อ 23 มกราคม 2564, จาก:  
[https://www.researchgate.net/figure/Composition-of-fatty-acid-profile-in-the-extracted-coffee-oil-with-hexane\\_tbl5\\_318594034](https://www.researchgate.net/figure/Composition-of-fatty-acid-profile-in-the-extracted-coffee-oil-with-hexane_tbl5_318594034)
- [11] Dhawan, M.S., Barton, S.C., Yadav, G.D. (2020). Interesterification of triglycerides with methyl acetate for the co-production biodiesel and triacetin using hydrotalcite as a heterogenous base catalyst. *Catalysis Today*.
- [12] Goembira, F., Matsuura, K., Saka, S. (2012). Biodiesel production from rapeseed oil by various supercritical carboxylate esters. *Fuel*. 97, 373-378.
- [13] ศศิกัญญา ดอนดีไพร. (2020). การสกัดด้วยตัวทำละลาย. ค้นเมื่อ 23 มกราคม 2564, จาก:  
<https://www.slideshare.net/jub21/ss-8396895>
- [14] สาลินี ศรีวงษ์ชัย. (2562). สภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟด้วยตัวทำละลายร่วมกับคลื่นเสียงความถี่สูงเพื่อเป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตไบโอดีเซล. โครงการวิจัยปริญญาบัณฑิต สาขาวิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และสังคมศาสตร์มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตสระแก้ว จังหวัดสระแก้ว.
- [15] Sanjib. (2017). A spent coffee grounds based biorefinery for the production of biofuels, biopolymers, antioxidants and biocomposites. *Journal of Waste Management*. 72, 240-254.
- [16] โชคชัย เหมือนมาศ และรวมพร นิคม. (2560). การศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันที่สกัดจากกากกาแฟ. วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ ปีที่ 20 ฉบับพิเศษ.
- [17] Kok, T.T., Keat, T.L. (2019). Biodiesel Production in Supercritical Fluids. *Biofuels: Alternative Feedstocks and Conversion Processes for the Production of Liquid and Gaseous Biofuels*. 22, 523-538.
- [18] Wirasinee, S. (2020). Biofuel production from spent coffee grounds by supercritical ethyl acetate (Master's thesis). Faculty of Science, Chulalongkorn University, Thailand.