

การทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกมังคุด



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2557
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PURIFICATION OF BIODIESEL BY ADSORPTION WITH
ACTIVATED CARBON PREPARED FROM MANGOSTEEN SHELL

Miss Wilaiwan Pangsupa



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2014

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ ที่เตรียมจากเปลือกมังคุด
โดย	นางสาววิไลวรรณ แฝงสุภา
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. มะลิ หุ่นสม

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ ทารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ พงษ์พานิช)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. มะลิ หุ่นสม)

.....กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตสานต์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สิริลักษณ์ เจียรนาร)

วิไลวรรณ แผงสุภา : การทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกมังคุด (PURIFICATION OF BIODIESEL BY ADSORPTION WITH ACTIVATED CARBON PREPARED FROM MANGOSTEEN SHELL) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. มะลิ ทุ่งสม, 85 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุดสำหรับการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ โดยการกระตุ้นเปลือกมังคุดด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์เท่ากับ 0.5-1.5 และอุณหภูมิการกระตุ้น 500-900 องศาเซลเซียส พบว่าอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์ และอุณหภูมิการกระตุ้นส่งผลต่อปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนและสมบัติทางพื้นผิวของถ่านกัมมันต์รวมถึงความสามารถในการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์อย่างชัดเจน ภาวะในการเตรียมถ่านกัมมันต์ที่ดีที่สุด คือ ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์เท่ากับ 1.25 กระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ซึ่งมีปริมาณหมู่คาร์บอนิล 11.62 มิลลิกรัมวาลেন্টต่อกรัม และพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ 1,207 ตารางเมตรต่อกรัม สามารถเพิ่มความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซลได้ถึงร้อยละ 97.18 โดยน้ำหนัก เมื่อดูดซับที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และไบโอดีเซลเท่ากับ 9 กรัมต่อลิตร เวลาในการดูดซับ 120 นาที และอัตราการเขย่า 250 รอบต่อนาที ซึ่งมีความบริสุทธิ์เทียบเท่ากับไบโอดีเซลที่ผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์และการล้างแบบเปียก ไอโซเทอรั่มการดูดซับสูงและสารปนเปื้อนอื่นในไบโอดีเซลเป็นไปตามแบบจำลองของฟรุนดิช จลนพลศาสตร์การดูดซับเป็นอันดับสอง การดูดซับถูกควบคุมด้วยการแพร่ของสูงและสารปนเปื้อนมาที่พื้นผิวของถ่านกัมมันต์ และถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้สามารถใช้ซ้ำได้ 1 ครั้ง เมื่อผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยเฮกเซนและความร้อน

ภาควิชา เคมีเทคนิค

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา เคมีเทคนิค

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2557

5572113023 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS: PURIFICATION / CRUDE BIODIESEL / ADSORPTION / ACTIVATED CARBON / REGENERATION

WILAIWAN PANGSUPA: PURIFICATION OF BIODIESEL BY ADSORPTION WITH ACTIVATED CARBON PREPARED FROM MANGOSTEEN SHELL. ADVISOR: ASSOC. PROF. MALI HUNSOM, Dr. de L'INPT, 85 pp.

This work was carried out to remove impurities in crude biodiesel via the adsorption process with mangosteen shell-derived activated carbon. The effects of KOH to char ratio in the range of 0.5-1.5 and activation temperature in the range of 500-900 °C on property and adsorption property of the obtained activated carbon were explored. It was found that the KOH to char ratio and activation temperature affected importantly the amount of oxygen-containing surface functional groups and textural property of activated carbon as well as the purity of biodiesel. The optimum KOH to char ratio and activation temperature for preparing activated carbon were 1.25 and 800 °C, respectively, which can enhance the generation of carbonyl group and BET surface area up to 11.62 mEq/g and 1,207 m²/g, respectively. By using such activated carbon at the dosage of 9 g/L biodiesel at 120 min adsorption time, the purity of biodiesel up to 97.18 wt.% was obtained, which was comparable with that purified by adsorption with commercial activated carbon and wet washing method. Equilibrium adsorption data fitted well with the Freundlich isotherms and the adsorption mechanism was controlled by the transport of some impurities from the bulk solution to the surface of the AC. The reusability of the mangosteen shell-derived activated carbon was possible for a time after regeneration with hexane and thermal.

Department: Chemical Technology Student's Signature

Field of Study: Chemical Technology Advisor's Signature

Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความอนุเคราะห์และช่วยเหลืออย่างยิ่งจาก รองศาสตราจารย์ ดร. มะลิ หนู่นสม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยให้คำปรึกษา คำแนะนำ ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะ นอกจากนี้ยังช่วยแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เก็จวลี พุกษาทร ประธานกรรมการ วิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร. ธรพวงษ์ วิทิตสานต์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สิริลักษณ์ เจียรกร กรรมการจากภายนอก ที่กรุณารับเชิญเป็นกรรมการสอบในการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้คำแนะนำ และข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบพระคุณ บริษัท บางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์ไปโอดีเซล ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ที่ บริษัท บางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) ทุกคนที่คอยให้คำปรึกษา และคำแนะนำเกี่ยวกับเรื่องกระบวนการผลิตไปโอดีเซลแก่ข้าพเจ้าตลอดมา

ขอขอบพระคุณภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมือในการทำวิจัย ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ให้ความรัก ความเมตตาและเอาใจใส่แก่ข้าพเจ้าตลอดมา และขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาเคมีเทคนิคที่อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการและความช่วยเหลือในการใช้เครื่องวิเคราะห์ต่างๆ ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ และนิสิตปริญญาโททุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ คำปรึกษา คำแนะนำ แสดงความคิดเห็น อำนวยความสะดวกและให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้าตลอดการศึกษาและทำวิจัย ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาและขอขอบพระคุณทุกท่านไว้ ณ โอกาสนี้

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและครอบครัว ที่คอยให้กำลังใจ คำปรึกษา คำแนะนำ และได้อบรมเลี้ยงดูให้มีความรัก ความเอาใจใส่ โอบอ้อมอารี และให้ทุนสนับสนุนการเรียนและการวิจัยแก่ข้าพเจ้าด้วยดีตลอดมาและขอขอบคุณทุกท่านที่มีได้กล่าวนาม ณ ที่นี้ที่มีส่วนช่วยให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ไบโอดีเซล	4
2.1.1 วัตถุดิบสำหรับการผลิตไบโอดีเซล.....	6
2.1.2 เทคนิคในการผลิตไบโอดีเซล	8
2.1.3 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันบริโภคที่ผ่านการใช้งานแล้ว.....	9
2.1.4 กระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์.....	15
2.2 การดูดซับ	16
2.2.1 พฤติกรรมดูดซับของสาร	16
2.2.2 กลไกการดูดซับ	17
2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ	18

2.2.4 ชนิดของตัวดูดซับ	19
2.3 ถ่านกัมมันต์	20
2.3.1 ชนิดของถ่านกัมมันต์	20
2.3.2 หลักการทำงานของถ่านกัมมันต์	21
2.3.3 การเตรียมถ่านกัมมันต์	22
2.3.4 การกระตุ้นถ่านกัมมันต์	23
2.3.6 หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์	25
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	31
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	31
3.1.1 การไฟโรไลซิสเปลือกมังคุดและการคาร์บอนไนซ์ถ่านชาร์	31
3.1.2 การกระตุ้นถ่านชาร์และการเพิ่มความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซล	31
3.1.3 การวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์และไบโอดีเซล	32
3.2 วัสดุดิบ.....	32
3.2.1 เปลือกมังคุดที่ได้จากการบริโภคตามบ้านเรือน	32
3.2.2 ไบโอดีเซล.....	32
3.3 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	33
3.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	33
3.4.1 การเตรียมตัวอย่างเปลือกมังคุด.....	33
3.4.2 การไฟโรไลซิส.....	33
3.4.3 การกระตุ้นถ่านชาร์	34
3.4.4 การทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือก มังคุดโดยกำหนดภาวะในการดูดซับครั้งที่	35

3.4.5 การฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการใช้งานแล้ว	36
บทที่ 4 การทดลองและอภิปรายผลการทดลองผล	37
4.1 สมบัติของวัตุดิบ	37
4.1.1 สมบัติของไบโอดีเซล.....	37
4.1.2 สมบัติของเปลือกมังคุดและถ่านชาร์	37
4.2 ภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุด	39
4.2.1 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์.....	39
4.2.2 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นถ่านกัมมันต์	45
4.3 ภาวะที่เหมาะสมในการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์	49
4.3.1 ผลของเวลาในการดูดซับ	49
4.3.2 ผลของอัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และไบโอดีเซล	50
4.3.3 ผลของความเร็วยวรอบในการเขย่า	51
4.4 ไอโซเทิร์มการดูดซับของถ่านกัมมันต์	56
4.5 จลนพลศาสตร์การดูดซับ	59
4.6 การฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์.....	62
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	65
5.1 สรุปผลการทดลอง	65
5.2 ข้อเสนอแนะ	65
รายการอ้างอิง	66
ภาคผนวก.....	70
ภาคผนวก ก การวิเคราะห์องค์ประกอบของถ่านกัมมันต์แบบประมาณ	71
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์.....	73
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์สมบัติของไบโอดีเซล.....	75

ญ

หน้า

ภาคผนวก ง การวิเคราะห์ค่าไอโอดีนของถ่านกัมมันต์.....	81
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	85



สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 กำหนดมาตรฐานและวิธีการตรวจสอบสมบัติของไบโอดีเซล	4
ตารางที่ 2.2 ปริมาณการผลิตพืชน้ำมันในประเทศไทย	6
ตารางที่ 4.1 สมบัติเบื้องต้นของไบโอดีเซลก่อนทำให้บริสุทธิ์ด้วยกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่ เตรียมได้จากเปลือกมังคุด.....	38
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณของเปลือกมังคุดและถ่านชาร์ที่ได้จากการ คาร์บอนไนซ์	39
ตารางที่ 4.3 ผลของอัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ต่อองค์ประกอบโดยประมาณของ ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกมังคุดโดยการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	40
ตารางที่ 4.4 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นต่อองค์ประกอบโดยประมาณของถ่านกัมมันต์ที่เตรียม จากเปลือกมังคุดโดยการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์.....	45
ตารางที่ 4.5 สมบัติเบื้องต้นของไบโอดีเซลที่ดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์และถ่านกัมมันต์ที่ เตรียมจากเปลือกมังคุด	54
ตารางที่ 4.6 สมบัติของถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์และถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกมังคุดและ ความสามารถในการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์.....	55
ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์โดยการดูดซับ	56
ตารางที่ 4.8 ค่าคงที่แลงเมียร์และพหุนิยมสำหรับสบู่และสารปนเปื้อนอื่นในการทำไบโอดีเซลให้ บริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกมังคุด.....	59
ตารางที่ 4.9 ค่าคงที่อัตราเร็วของการดูดซับสบู่และสารปนเปื้อนอื่นๆ ในไบโอดีเซลด้วยถ่านกัม มันต์ที่เตรียมจากเปลือกมังคุดเมื่อใช้จลนศาสตร์อันดับหนึ่งเทียมและจลนศาสตร์อันดับสอง	62
ตารางที่ ข.1 ตัวอย่างการคำนวณปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์.....	74
ตารางที่ ง.1 การประมาณน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ที่ใช้วิเคราะห์ค่าไอโอดีน	84

สารบัญภาพ

ภาพที่ 2.1 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของการผลิตไบโอดีเซล[1] 4

ภาพที่ 2.2 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ผ่านการใช้งานแล้ว 11

ภาพที่ 2.3 กลไกการดูดซับสารปนเปื้อนบนพื้นผิวของตัวดูดซับที่มีรูพรุน 18

ภาพที่ 2.4 ตัวดูดซับ (ก) ซีโอไลท์ (ข) อะลูมินากัมมันต์ (ค) ซิลิกาเจล (ง) ถ่านกัมมันต์ 20

ภาพที่ 2.5 ชนิดของถ่านกัมมันต์ (ก) ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (ข) ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด (ค) ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด และ (ง) ถ่านกัมมันต์ชนิดเส้นใย 21

ภาพที่ 2.6 แบบจำลองโครงสร้างภายในของถ่านกัมมันต์ 22

ภาพที่ 2.7 หมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์บนขอบของระนาบชั้นแกรไฟิน 26

ภาพที่ 3.1 (ก) เปลือกมังกุคุดสด และ (ข) เปลือกมังกุคุดที่ผ่านการทำความสะอาดและอบแห้งแล้ว ... 32

ภาพที่ 3.2 ไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้น้ำมันพืชหรือสัตว์ที่ผ่านการใช้งานแล้วเป็นสารตั้งต้น 32

ภาพที่ 3.3 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งสำหรับการไพโรไลซิสเปลือกมังกุคุดและการคาร์บอนไนซ์ถ่านชาร์ 34

ภาพที่ 4.1 องค์ประกอบในไบโอดีเซลจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่ใช้น้ำมันบริโภคที่ผ่านการใช้งานแล้วเป็นสารตั้งต้น 38

ภาพที่ 4.2 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ต่อปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เวลาดูดซับสาร 24 ชั่วโมง กระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส 41

ภาพที่ 4.3 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านกัมมันต์ต่อพื้นที่ผิว BET ของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิการกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส เวลาดูดซับสารกระตุ้น 24 ชั่วโมง..... 43

- ภาพที่ 4.4 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านกัมมันต์ต่อ (■) ปริมาตรรูพรุนแบบไมโครพอร์และ (■) ปริมาตรรูพรุนแบบเมโซพอร์ของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิการกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส เวลาดูดซับสารกระตุ้น 24 ชั่วโมง..... 43
- ภาพที่ 4.5 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ตต่อองค์ประกอบไนโปโอติเซลโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิการกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส ดูดซับสารปนเปื้อนไนโปโอติเซลที่อัตราส่วนระหว่างถ่าน กัมมันต์และไนโปโอติเซลเท่ากับ 7 กรัมต่อลิตรต่อลิตรอัตราการเขย่า 250 รอบต่อนาที เวลาในการดูดซับ 60 นาที : (■) เมทิลเอสเทอร์ (■) สบู่ และ (□) สารปนเปื้อน 44
- ภาพที่ 4.6 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ตต่อปริมาณกลีเซอรอลและกรดไขมันอิสระในไนโปโอติเซล โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียม ไฮดรอกไซด์ กระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส..... 44
- ภาพที่ 4.7 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ต่อปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ตเท่ากับ 1.25 เวลาการดูดซับสารกระตุ้น 24 ชั่วโมง 46
- ภาพที่ 4.8 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ต่อพื้นที่ผิว BET ของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ตเท่ากับ 1.25 เวลาดูดซับสาร 24 ชั่วโมง 47
- ภาพที่ 4.9 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ต่อ (■) ปริมาตรรูพรุนแบบไมโครพอร์และ (■) ปริมาตรรูพรุนแบบเมโซพอร์ของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ตเท่ากับ 1.25 เวลาดูดซับสาร 24 ชั่วโมง 48
- ภาพที่ 4.10 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ต่อองค์ประกอบของไนโปโอติเซลที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์ตเท่ากับ 1.25 และเวลาดูดซับสารกระตุ้น 24 ชั่วโมง ดูดซับสารปนเปื้อนไนโปโอติเซลที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และไนโปโอติเซลเท่ากับ 7 กรัมต่อลิตรต่อลิตรอัตราการเขย่า 250 รอบต่อนาที เวลาในการดูดซับ 60 นาที : (■) เมทิลเอสเทอร์ (■) สบู่ และ (□) สารปนเปื้อนอื่น 48
- ภาพที่ 4.11 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ต่อปริมาณกลีเซอรอลและกรดไขมันอิสระในไนโปโอติเซลที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดร

- อกไซด์ที่อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์เท่ากับ 1.25 และเวลาดูดซับสาร
 กระตุ้น 24 ชั่วโมง ดูดซับสารปนเปื้อนในไบโอดีเซลที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์ และไบโ
 อดีเซลเท่ากับ 7 กรัมต่อลิตรต่อลิตรอัตราการเขย่า 250 รอบต่อนาที เวลาในการดูดซับ 60 นาที 49
- ภาพที่ 4.12 ผลของเวลาในการดูดซับต่อองค์ประกอบในการทำไบโอดีเซลที่ผ่านการดูดซับด้วย
 ถ่าน กัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และ ไบโ
 อดีเซลเท่ากับ 9 กรัมต่อลิตร ความเร็วรอบในการเขย่า 250 รอบต่อนาที: (■)เมทิล- เอสเทอร์
 (■) สบู่ และ (□) สารปนเปื้อนอื่น 50
- ภาพที่ 4.13 ผลของอัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และไบโอดีเซลต่อองค์ประกอบในไบโอดีเซลที่
 ผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ดูดซับที่อัตราส่วนระหว่าง
 ถ่านกัมมันต์และไบโอดีเซลเท่ากับ 9 กรัมต่อลิตร ความเร็วรอบในการเขย่า 250 รอบต่อนาที:
 (■) เมทิลเอสเทอร์ (■) สบู่ และ (□) สารปนเปื้อนอื่นๆ 52
- ภาพที่ 4.14 ผลของความเร็วรอบในการเขย่าต่อองค์ประกอบในไบโอดีเซลที่ผ่านการดูดซับด้วย
 ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ดูดซับที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และไบ
 โอดีเซลเท่ากับ 9 กรัมต่อลิตร เวลาในการดูดซับ 120 นาที: (■) เมทิลเอสเทอร์ (■) สบู่ และ
 (□) สารปนเปื้อนอื่นๆ..... 52
- ภาพที่ 4.15 (ก) สมดุลการดูดซับและกราฟเชิงเส้นของไอโซเทิร์ม (ข) แลงเมียร์ และ (ค) ฟรุนดิช
 สำหรับการดูดซับสบู่และสารปนเปื้อนในไบโอดีเซลที่ดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือก
 มังคุดที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียม ไฮดรอกไซด์และ
 ถ่านชาร์เท่ากับ 1.25 ที่อุณหภูมิการกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส..... 58
- ภาพที่ 4.16 จลนศาสตร์การดูดซับสบู่และสารปนเปื้อนอื่นในไบโอดีเซลด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียม
 จากเปลือกมังคุดที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ อัตราส่วนระหว่างโพแทส- เซียมไฮดรอก
 ไซด์และถ่านชาร์เท่ากับ 1.25 ที่อุณหภูมิการกระตุ้น 800 องศาเซลเซียสเมื่อใช้แบบจำลอง (ก)
 อันดับหนึ่งเทียมและ (ข) อันดับสอง 61
- ภาพที่ 4. 17 จลนพลศาสตร์การดูดซับสบู่และสารปนเปื้อนอื่นในไบโอดีเซลด้วยถ่านกัมมันต์ที่
 เตรียมจากเปลือกมังคุดที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียม
 ไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์เท่ากับ 1.25 ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ดูดซับที่อัตราส่วนระหว่าง
 ถ่านกัมมันต์และไบโอดีเซล 9 กรัมต่อลิตร 62
- ภาพที่ 4.18 การฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ด้วยเฮกเซนและความร้อนต่อปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มี
 ออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการใช้งานแล้ว ดูดซับที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์

และไบโอดีเซลเท่ากับ 9 กรัมต่อลิตร อัตราการเขย่า 250 รอบต่อนาที เวลาในการดูดซับ 120 นาที..... 64

ภาพที่ 4.19 การฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ด้วยเฮกเซนและความร้อนต่อองค์ประกอบของไบโอดีเซลที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยเฮกเซน: (■) เมทิลเอสเทอร์ (■) สบู่และ (□) สารปนเปื้อน : หมายเหตุ การฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ครั้งที่ 0 คือ ถ่านกัมมันต์ใหม่ 64

ภาพที่ ค.1 การอ่านค่าไฮโดรมิเตอร์เมื่อใช้น้ำมันที่โปร่งแสง..... 78



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากราคาเชื้อเพลิงในตลาดโลกมีความผันผวนอย่างมาก อีกทั้งปริมาณความต้องการในการใช้เชื้อเพลิงเพิ่มมากขึ้น ทำให้ในปัจจุบันมีการคิดค้นพลังงานชนิดอื่นเพื่อทดแทนการใช้พลังงานจากน้ำมันปิโตรเลียมเพียงอย่างเดียว ซึ่งพลังงานทดแทนที่ได้รับความนิยมอย่างมากชนิดหนึ่งคือไบโอดีเซล (Biodiesel) โดยปกติแล้วไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงที่ได้จากน้ำมันพืชและไขมันสัตว์ เช่น ปาล์ม มะพร้าว ถั่วเหลือง หรือน้ำมันพืช ทำปฏิกิริยาทางเคมีร่วมกับแอลกอฮอล์ เช่น เมทานอล หรือเอทานอล โดยมีกรดหรือเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เรียกปฏิกิริยาดังกล่าวว่า ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน (transesterification) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบเอสเทอร์ที่มีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล อย่างไรก็ตามไบโอดีเซลที่ได้จากกระบวนการผลิตจะมีการปนเปื้อนของสารต่างๆ เช่น กลีเซอรอล เมทานอล สารจำพวกเอสเทอร์ กรดไขมัน น้ำ สบู่ และพวกโลหะบางชนิด โดยสารเหล่านี้มีผลต่อระบบเผาไหม้ในเครื่องยนต์ ดังนั้นไบโอดีเซลที่ผลิตได้ก่อนนำมาใช้ควรผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์เสียก่อน กระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์สามารถทำได้ 2 วิธี คือ การล้างแบบเปียกและการล้างแบบแห้ง ซึ่งวิธีที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือวิธีการล้างแบบเปียก โดยการใช้น้ำในการล้างไบโอดีเซล แต่วิธีการดังกล่าวมีข้อเสียคือ ก่อให้เกิดน้ำเสียที่มีลักษณะสีขาวขุ่นคล้ายนมในปริมาณมากและมีการสูญเสียไบโอดีเซลไปกับน้ำเสีย การล้างแบบแห้งจึงเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่มีความสนใจเนื่องจากวิธีการดังกล่าวไม่ก่อให้เกิดน้ำเสียจากกระบวนการล้างและยังไม่ทิ้งสารตกค้างในไบโอดีเซลอีกด้วย ทำให้ไบโอดีเซลที่ได้มีปริมาณและคุณภาพสูงขึ้น งานวิจัยนี้สนใจกระบวนการล้างไบโอดีเซลแบบแห้งโดยกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกมังคุด เนื่องจากกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ ดำเนินการได้ที่อุณหภูมิห้องภายใต้ความดันบรรยากาศ ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการใช้งานแล้วสามารถนำกลับมาฟื้นฟูสภาพและใช้ดูดซับใหม่ได้ ซึ่งเป็นการลดต้นทุนในการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์เมื่อเทียบกับการล้างแบบเปียก อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับของเสียหรือวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่จะนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุดโดยการกระตุ้นด้วยวิธีทางเคมี

2. เพื่อศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

เตรียมถ่านกัมมันต์จากกากเปลือกมังคุดโดยการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ วิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ ศึกษาประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ในการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยการดูดซับ ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสารปนเปื้อนในการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ ศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ และศึกษาการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกมังคุด

1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

1. ค้นคว้าข้อมูลทฤษฎีและรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งในและต่างประเทศ
2. จัดเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับการดำเนินงานวิจัย
3. เตรียมถ่านชาร์จากเปลือกมังคุดโดยการให้ความร้อนอย่างช้าๆ ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที
4. ศึกษาผลของตัวแปรในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุดโดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้น ตัวแปรที่ศึกษาที่ศึกษา คือ
 - อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นต่อถ่านกัมมันต์อยู่ในช่วง 0.5 ถึง 1.5
 - อุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ในช่วง 500 ถึง 900 องศาเซลเซียส
5. วิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์ ได้แก่ พื้นที่ผิว (BET surface area) ปริมาตรรูพรุนรวม (Total pore volume) ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (Average pore diameters) ปริมาณหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ วิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate analysis)
6. วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไบโอดีเซล ได้แก่ ความหนาแน่น จุดวาบไฟ ความหนืด เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชัน เมทิลเอสเทอร์ ค่าความเป็นกรด กรดไขมันอิสระ กลีเซอรอล สบู่ และน้ำ
7. วิเคราะห์สมบัติของไบโอดีเซลที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ ได้แก่ ความหนาแน่น จุดวาบไฟ ความหนืด เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชัน เมทิลเอสเทอร์ ค่าความเป็นกรด กรดไขมันอิสระ กลีเซอรอล สบู่ น้ำ

8. ศึกษาการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกมังคุดที่ผ่านการใช้งานแล้ว
9. วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุดโดยการกระตุ้นด้วยวิธีทางเคมี
2. ภาวะที่เหมาะสมในการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์

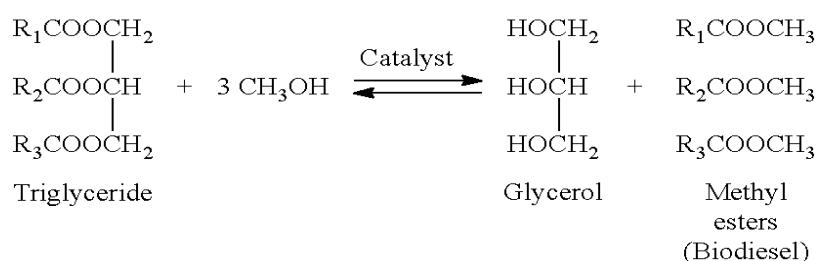


บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไบโอดีเซล

เนื่องจากปริมาณความต้องการในการใช้เชื้อเพลิงดีเซลเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งราคาเชื้อเพลิงดีเซลในตลาดโลกมีความผันผวนอย่างมาก ทำให้ในปัจจุบันมีการคิดค้นพลังงานชนิดอื่นเพื่อทดแทนการใช้ น้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมเพียงอย่างเดียว พลังงานทดแทนที่กำลังได้รับความสนใจในปัจจุบัน คือ ไบโอดีเซล (Biodiesel) เนื่องจากมีความปลอดภัยในการใช้งาน ไม่มีองค์ประกอบของสารแอโรแมติกย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติและไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงที่ได้จาก น้ำมันพืชและไขมันสัตว์ เช่น ปาล์ม มะพร้าว ถั่วเหลือง หรือน้ำมันพืช มีชื่อทางเคมีคือ เอสเทอร์ (Ester) ทำปฏิกิริยาทางเคมีร่วมกับแอลกอฮอล์ เช่น เมทานอล หรือเอทานอล โดยมีกรดหรือเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เรียกปฏิกิริยาดังกล่าวว่า ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification) ดังภาพที่ 2.1 ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบเอสเทอร์ที่มีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล การเรียกชื่อเอสเทอร์ที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เช่น เรียกเมทิลเอสเทอร์ เมื่อใช้เมทานอลในการทำปฏิกิริยา เป็นต้น



ภาพที่ 2.1 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของการผลิตไบโอดีเซล[1]

คุณภาพของไบโอดีเซลที่ผลิตได้จะถูกควบคุมด้วยมาตรฐานและวิธีการตรวจสอบสมบัติ[2] ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 กำหนดมาตรฐานและวิธีการตรวจสอบสมบัติของไบโอดีเซล

รายการ	สมบัติ	ข้อกำหนด	วิธีทดสอบ
1	เมทิลเอสเทอร์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่ ต่ำกว่า 96.5	EN 14103

รายการ	สมบัติ	ข้อกำหนด	วิธีทดสอบ
2	ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	ไม่ต่ำกว่า 860 และ ไม่สูงกว่า 900	ASTM D1298
3	ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (เซนติสโตกส์)	ไม่ต่ำกว่า 3.5 และ ไม่สูงกว่า 5.0	ASTM D 445
4	จุดวาบไฟ (องศาเซลเซียส)	ไม่ต่ำกว่า 120	ASTM D 93
5	กำมะถัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่ ต่ำกว่า 0.0010	ASTM D2622
6	กากถ่าน (ร้อยละ 10 ของกากที่เหลือจากการกลั่น) (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า 0.30	ASTM D4530
7	จำนวนซีเทน	ไม่ต่ำกว่า 51	ASTM D 613
8	เถ้าซัลเฟต (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า 0.02	ASTM D 874
9	น้ำ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า 0.050	ASTM D2709
10	สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า 0.0024	ASTM D5452
11	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง	ไม่สูงกว่า 96.5	ASTM D 130
12	เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส (ชั่วโมง)	ไม่ต่ำกว่า 6	EN 14112
13	ค่าความเป็นกรด (มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม)	ไม่สูงกว่า 0.50	ASTM D 664
14	ค่าไอโอดีน (กรัมไอโอดีนต่อ 100 กรัม)	ไม่สูงกว่า 120	EN 14111
15	กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า 12	EN 14103
16	เมทานอล (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า 0.20	EN 14110
17	โมนอกลิเซอไรด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า 0.80	EN 14105
18	ไดกลีเซอไรด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า 0.20	EN 14105
19	ไตรกลีเซอไรด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า 0.20	EN 14105
20	กลีเซอรินอิสระ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า 0.02	EN 14105
21	กลีเซอรินทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า 0.25	EN 14105
22	โลหะกลุ่มที่ 1 โซเดียมและโพแทสเซียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ไม่สูงกว่า 5.0 ไม่สูงกว่า 5.0	EN14108 และ EN14109

รายการ	สมบัติ	ข้อกำหนด	วิธีทดสอบ
	โลหะกลุ่มที่ 2 แคลเซียมและแมกนีเซียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)		
23	ฟอสฟอรัส (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า 0.0010	
24	สารเติมแต่ง ถ้ามี	ตามความเห็นชอบกรมธุรกิจพลังงาน	

2.1.1 วัตถุประสงค์สำหรับการผลิตไบโอดีเซล

วัตถุประสงค์สำหรับการผลิตไบโอดีเซลแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ วัตถุประสงค์จากน้ำมันพืชและน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ที่ผ่านการใช้งานแล้ว ประเทศไทยนิยมผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ที่ผ่านการใช้งานแล้วมากกว่าน้ำมันพืชบริสุทธิ์ เนื่องจากมีราคาถูกกว่าน้ำมันบริสุทธิ์และเป็นการใช้ของเสียให้เกิดประโยชน์ ซึ่งเป็นการช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อม [3]

ก. น้ำมันพืช

ประเทศไทยมีกำลังการผลิตพืชน้ำมันที่เป็นพืชเศรษฐกิจหลายชนิดรวมมากกว่า 5 ล้านตันต่อปี ดังแสดงในตารางที่ 2.2 พืชน้ำมันที่ผลิตได้มากที่สุดในประเทศไทย คือ ปาล์มน้ำมัน รองลงมาคือ มะพร้าวและถั่วเหลือง ตามลำดับ ซึ่งน้ำมันจากพืชเหล่านี้สามารถนำมาผลิตเป็นไบโอดีเซลได้ [4]

ตารางที่ 2.2 ปริมาณการผลิตพืชน้ำมันในประเทศไทย

ปี พ.ศ.	ปริมาณการผลิต (พันตัน)						รวม
	ปาล์มน้ำมัน	มะพร้าว	ถั่วเหลือง	ถั่วลิสง	ละหุ่ง	งา	
2539	2,688	359	147	1,419	6	34	4,653
2540	2,681	338	126	1,386	6	35	4,572
2541	2,465	321	135	1,372	7	36	4,336
2542	3,512	319	138	1,381	7	37	5,394
2543	3,256	324	135	1,400	9	39	5,163

นอกจากพืชน้ำมันที่เป็นพืชเศรษฐกิจแล้ว ยังมีพืชอีกหลายชนิดที่ได้รับการส่งเสริมให้ปลูกเพื่อนำน้ำมันไปผลิตเป็นไบโอดีเซลโดยเฉพาะ ซึ่งลักษณะของพืชแต่ละชนิดที่กล่าวมาสามารถอธิบายได้พอสังเขป ดังนี้

- เมล็ดเรพ เรพเป็นพืชล้มลุกที่ปลูกได้ดีในพื้นที่ที่มีดินชั้นมีปริมาณฝนและความชื้นสูงเพาะปลูกมากในประเทศแถบยุโรป สหรัฐอเมริกา จีน และอินเดีย เพื่อใช้ผลิตน้ำมันพืชสำหรับบริโภคและ

ใช้เป็นอาหารสัตว์ ในปีพ.ศ. 2543 ประเทศในแถบยุโรปเริ่มใช้น้ำมันเมล็ดเรพเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล เนื่องจากเมล็ดเรพให้ปริมาณน้ำมันสูงถึงร้อยละ 38-44

- ปาล์มน้ำมัน ปาล์มน้ำมันจัดเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศและเป็นพืชที่ให้ผลผลิตน้ำมันต่อหน่วยพื้นที่สูงกว่าพืชน้ำมันทุกชนิด สามารถแปรรูปเป็นน้ำมันปาล์มประกอบอาหารและใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล เนื่องจากปาล์มน้ำมันเป็นพืชน้ำมันที่ให้ปริมาณน้ำมันสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับพืชน้ำมันชนิดอื่น นอกจากนี้ปาล์มน้ำมันยังมีต้นทุนในการผลิตต่ำ โดยน้ำมันปาล์มแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ น้ำมันเมล็ดในปาล์ม คือ ส่วนที่สกัดได้จากเมล็ดในของผลปาล์มและน้ำมันปาล์มดิบ คือ ส่วนที่สกัดได้จากส่วนเปลือกสดของผลปาล์ม น้ำมันเมล็ดในปาล์มและน้ำมันปาล์มดิบ มีสมบัติทางเคมีที่แตกต่างกันอย่างมาก โดยน้ำมันปาล์มดิบมีลักษณะเป็นของเหลวปนอยู่กับของแข็งที่อุณหภูมิห้อง โดยจะต้องแยกส่วนของเหลวและของแข็งออกจากกัน เพื่อให้ได้น้ำมันปาล์มดิบบริสุทธิ์ โดยส่วนที่เป็นของเหลวที่แยกออกมา เรียกว่า น้ำมันปาล์มโอลีน และส่วนที่เป็นของแข็งเรียกว่า ปาล์มสเตียรีน หรือไฮสเตียรีน ซึ่งน้ำมันทุกส่วนที่ได้จากปาล์มน้ำมันสามารถนำมาผลิตเป็นไบโอดีเซลได้

- มะพร้าว ประเทศไทยมีการปลูกมะพร้าวมากเป็นอันดับ 7 ของโลก มีผลผลิตประมาณ 1.4 ล้านตันต่อปี การผลิตน้ำมันมะพร้าวในเชิงอุตสาหกรรมเป็นการสกัดน้ำมันจากเนื้อมะพร้าวแห้ง เพื่อใช้บริโภคและใช้ในอุตสาหกรรม ประเทศฟิลิปปินส์เป็นประเทศที่ส่งเสริมให้มีการใช้ไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันมะพร้าว

- ถั่วเหลือง ถั่วเหลืองเป็นพืชน้ำมันประเภทพืชล้มลุกที่มีผลผลิตสูงเป็นอันดับ 3 รองจากปาล์มน้ำมันและมะพร้าว นอกจากนี้ถั่วเหลืองยังสามารถนำมาแปรรูปเป็นอาหารและเป็นน้ำมันพืชเพื่อการบริโภค ปัจจุบันมีการส่งเสริมให้ผลิตถั่วเหลืองในเชิงอุตสาหกรรม โดยนำถั่วเหลืองมาเป็นสารตั้งต้นในการผลิตไบโอดีเซล

- สบู่ดำ สบู่ดำเป็นไม้พุ่มยืนต้น ทนแล้งได้ดี เนื่องจากเมล็ดสบู่ดำมีน้ำมันเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง ทำให้สบู่ดำมีศักยภาพสูงในการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบหลักสำหรับผลิตพลังงานทดแทน ทำให้ประเทศไทยหันมาให้ความสนใจในการนำน้ำมันสบู่ดำมาเป็นพลังงานทดแทน นอกจากนี้สบู่ดำยังมีประโยชน์ในการป้องกันการกัดเซาะหน้าดินจากลมและน้ำ รวมทั้งยังช่วยปรับปรุงคุณภาพดินให้สามารถเพาะปลูกพืชชนิดอื่นได้ [5]

ข. น้ำมันบริโภคที่ผ่านการใช้งานแล้ว

เนื่องจากวัตถุดิบหลักที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล คือ น้ำมันพืชที่ใช้ในการบริโภคซึ่งมีปริมาณความต้องการเพิ่มขึ้นเนื่องจากจำนวนประชากรที่เพิ่มมากขึ้น อีกทั้งกำลังการผลิตจากภาคเกษตรกรรมที่ขึ้นอยู่กับปัจจัยทางสิ่งแวดล้อม ส่งผลให้ปริมาณการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันบริโภคที่ใช้ในการบริโภคในประเทศไทยเติบโตอย่างช้าๆ

น้ำมันบริโภคที่ผ่านการใช้งานแล้วจึงเป็นแหล่งวัตถุดิบสำคัญอีกแหล่งหนึ่งในการผลิตไบโอดีเซล ประเทศไทยมีปริมาณน้ำมันบริโภคใช้แล้วมากกว่า 74 ล้านลิตรต่อปี ซึ่งสามารถนำมาผลิตไบโอดีเซลทดแทนการใช้น้ำมันพืชเพื่อการบริโภคได้ การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันบริโภคที่ผ่านการใช้แล้วมีข้อดีอยู่หลายประการ

- ลดวัตถุดิบน้ำมันพืชที่ใช้ในการบริโภค เนื่องจากความต้องการน้ำมันพืชเพื่อการบริโภคสูงขึ้นตามจำนวนประชากรที่เพิ่มสูงขึ้น การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันบริโภคที่ผ่านการใช้แล้วจึงเป็นการลดวัตถุดิบน้ำมันพืชที่ใช้ในการบริโภค ทำให้อุตสาหกรรมการผลิตไบโอดีเซลยังคงดำเนินต่อไปได้โดยไม่โดยส่งผลกระทบต่อการใช้บริโภคของประชากร

- นำของเสียมาใช้ให้เกิดประโยชน์ น้ำมันบริโภคที่ผ่านการใช้งานแล้วจัดเป็นของเสียที่ได้จากกระบวนการประกอบอาหาร การนำน้ำมันดังกล่าวมาผลิตไบโอดีเซลจึงเปรียบเสมือนการนำของเสียมาใช้ให้เกิดประโยชน์ เป็นการเพิ่มมูลค่าของน้ำมันพืชที่ผ่านการงานใช้งานแล้ว และช่วยลดปริมาณของเสียที่จะปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม

- ลดต้นทุนการผลิตไบโอดีเซล เนื่องจากราคาน้ำมันที่ผ่านการใช้งานแล้วมีราคาถูกกว่าน้ำมันเพื่อการบริโภค ทำให้การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้วมีต้นทุนต่ำกว่าการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเพื่อการบริโภค ต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่าทำให้ไบโอดีเซลที่ผลิตได้ มีข้อได้เปรียบทางการตลาดเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มโอกาสให้มีการใช้ไบโอดีเซลอย่างแพร่หลายมากยิ่งขึ้น

2.1.2 เทคนิคในการผลิตไบโอดีเซล

เทคนิคในการผลิตไบโอดีเซลสามารถดำเนินการได้หลายวิธี ดังนี้

ก. การใช้โดยตรงและการผสมของน้ำมันพืช การใช้โดยตรง คือ นำน้ำมันปาล์ม น้ำมันมะพร้าว น้ำมันถั่วเหลืองมาใช้เลย โดยไม่ผสมกับสารเคมีอื่นหรือไม่ต้องผ่านกระบวนการเปลี่ยนแปลงสมบัติของน้ำมัน ส่วนแบบผสม คือ การผสมระหว่างน้ำมันพืชกับน้ำมันดีเซลหรือน้ำมันชนิดอื่นๆ ก่อนนำไปใช้งานจริง เพื่อให้มีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล

ข. ไมโครอิมัลชัน (Microemulsion) คือ การทำให้น้ำมันพืชมีค่าความหนืดลดลงโดยใช้ตัวทำละลาย เช่น เมทานอล เอทานอล และบิวทานอล ไมโครอิมัลชันที่เกิดขึ้นระหว่างเมทานอลและน้ำมันพืชจะให้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำมันที่มีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล แต่วิธีการนี้มีข้อเสีย คือ การสะสมตัวของคราบอิมันชั้นบริเวณหัวฉีดและวาล์วของเครื่องยนต์ วิธีนี้จึงไม่ได้รับความนิยมในการผลิตไบโอดีเซล

ค. กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) เป็นกระบวนการเปลี่ยนโครงสร้างของสารประกอบโดยใช้ความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา โดยควบคุมปริมาณอากาศเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเผาไหม้ที่

สมบูรณ์ โดยสารประกอบที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสจะถูกทำให้มีขนาดเล็ก ข้อเสียของกระบวนการนี้ คือ การควบคุมให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เนื่องจากความหลากหลายของปฏิกิริยาวัตถุประสงค์ที่สามารถนำมาใช้ในกระบวนการไพโรไลซิส ได้แก่ น้ำมันพืช ไขมันสัตว์

ง. การทำปฏิกิริยากับเมทานอลในภาวะเหนือวิกฤต เป็นกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ข้อดีของวิธีนี้ คือ ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยและไม่มีของเสียจากกระบวนการ ข้อเสีย คือ ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิและความดันสูง เพื่อให้เมทานอลอยู่ในภาวะเหนือวิกฤต

จ. ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน เป็นการทำปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างน้ำมันหรือไขมันกับแอลกอฮอล์ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเอสเทอร์และกลีเซอรอล โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นตัวช่วยให้เกิดเร็วขึ้น ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ชนิด ดังนี้

ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสที่นิยมใช้ คือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ข้อดี คือ ต้นทุนการผลิตต่ำ เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ใช้อุณหภูมิและความดันต่ำและให้ผลผลิตสูงถึงร้อยละ 98 ข้อเสีย คือ ไม่เหมาะกับน้ำมันหรือไขมันที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระสูง

- ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดที่นิยมใช้ คือ กรดซัลฟูริก กรดคาร์บอนิก ข้อดีของกระบวนการนี้ คือ ใช้ได้กับวัตถุดิบทุกชนิด ข้อเสีย คือ ใช้อุณหภูมิสูงและเวลาในการทำปฏิกิริยานาน

- เอนไซม์ไลเปส ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ในกระบวนการนี้ คือ แอลกอฮอล์ไลซิสและแอซิโตไลซิส โดยข้อดีของกระบวนการนี้ คือ เอนไซม์สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้และไม่เกิดของเสียจากกระบวนการนี้

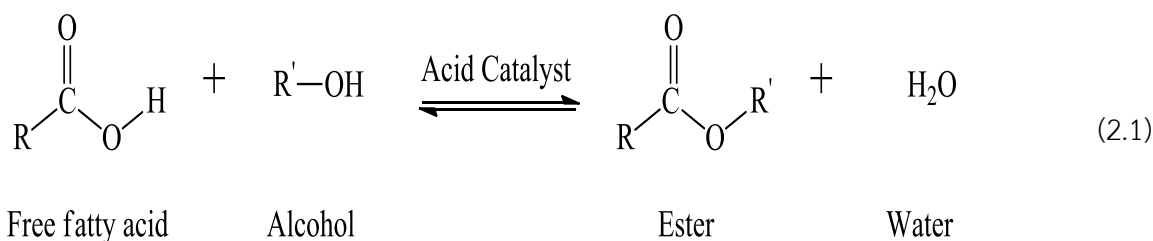
- ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกันในปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน เช่น ซีโอไลต์ ซิงค์ออกไซด์ เป็นต้น การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้สามารถลดการเกิดสบู่ได้

ฉ. กระบวนการ 2 ขั้นตอน เป็นกระบวนการใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อเปลี่ยนกรดไขมันเป็นสารประกอบเอสเทอร์ในกระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชัน และทำกระบวนการทรานเอสเทอร์ฟิเคชันต่อโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ข้อเสีย คือ ถ้าน้ำมันหรือไขมันมีค่าความเป็นกรดสูงมาก ๆ ต้องใช้เวลาในกระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชันมากขึ้น ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น

2.1.3 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันบริโภคที่ผ่านการใช้งานแล้ว

ภาพที่ 2.2 แสดงกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันบริโภคที่ผ่านการใช้งานแล้ว [6] ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนย่อยหลายขั้นตอน ดังนี้

ก. การเตรียมวัตถุดิบ น้ำมันบริโภคที่ผ่านการใช้งานหรือการทอดที่อุณหภูมิสูงหลายครั้ง จะมีการสลายตัวของไตรกลีเซอไรด์เป็นกรดไขมันอิสระ กรดไขมันอิสระเหล่านี้ส่งผลต่อปฏิกิริยาทรานส์-เอสเทอร์ฟิเคชันประเภทใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การแก้ปัญหาการมีปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันบริโภคที่ผ่านการใช้งานแล้ว ดำเนินการโดยการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันกับแอลกอฮอล์โดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา [4] ดังสมการที่ (2.1)



ดังนั้นก่อนนำน้ำมันบริโภคที่ผ่านการใช้งานแล้วมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตไบโอดีเซลงาน จึงต้องทราบค่าความเป็นกรดก่อนเพื่อลดการสูญเสียน้ำมัน และป้องกันการเกิดปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์

ข. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา คำนวณปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลก่อนผสมกับเมทานอลในภาวะปราศจากน้ำ สารผสมที่ได้เรียกว่า โซเดียมเมทอกไซด์ จากนั้นป้อนสารที่ได้เข้าถังพัก เพื่อเตรียมพร้อมในการทำปฏิกิริยาต่อไป

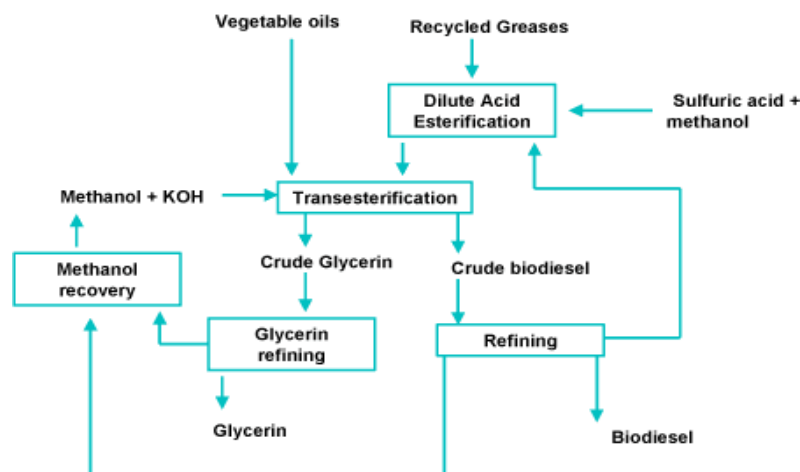
ค. การทำปฏิกิริยา การผลิตไบโอดีเซลต้องมีเวลามากพอที่ให้สารตั้งต้นผสมกันและทำปฏิกิริยาสมบูรณ์เพื่อให้ได้ไบโอดีเซลที่มีคุณภาพ กระบวนการผลิตไบโอดีเซล แสดงดังภาพที่ 2.2

ง. การนำเมทานอลกลับคืน การผลิตไบโอดีเซลนิยมใช้เมทานอลมากเกินไป เพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดได้อย่างรวดเร็วและสมบูรณ์ หลังจากปฏิกิริยาสิ้นสุดจะมีปริมาณเมทานอลเหลืออยู่ ควรนำเมทานอลที่เหลือกลับมาใช้ใหม่ โดยการนำกลับเมทานอลอาจทำก่อนหรือหลังจากแยกกลีเซอรอลออกจากไบโอดีเซลแล้วก็ได้

จ. การแยกไบโอดีเซล ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน คือ ไบโอดีเซล และกลีเซอรอล สารทั้ง 2 ชนิดมีความจะอยู่ชั้นบนและกลีเซอรอลอยู่ชั้นล่าง การผลิตไบโอดีเซลจะทำการแยกกลีเซอรอลออกทางส่วนล่างของถังไปยังถังเก็บกลีเซนาแน่นต่างกัน ทำให้สามารถแยกผลิตภัณฑ์ออกจากกันได้ โดยไบโอดีเซลมีความหนาแน่นน้อยกว่ากลีเซอรอล อรอล ส่วนไบโอดีเซลที่ได้จะผ่านกระบวนการล้างไบโอดีเซลต่อไปเพื่อกำจัดสารปนเปื้อนอื่นๆ ที่ปนมากับไบโอดีเซล เช่น กลีเซอรอล เมทานอล สารจำพวกเอสเทอร์ กรดไขมัน น้ำ สบู่ และพวกโลหะบางชนิด เนื่องจากสารเหล่านี้มีผลต่อระบบเผาไหม้ในเครื่องยนต์[7] กล่าวคือ

- ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ มาตรฐานกำหนดให้มีปริมาณเมทิลเอสเทอร์มากกว่าร้อยละ 96.5 โดยน้ำหนัก เมทิลเอสเทอร์จะแสดงถึงความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซลและการเกิดปฏิกิริยาทรานส์

เอสเทอร์ฟิเคชันที่สมบูรณ์ ปริมาณเอสเทอร์ที่น้อยกว่าที่กำหนดเป็นตัวชี้บอกลงถึงปริมาณมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลิเซอไรด์ หรือไตรกลิเซอไรด์ที่ยังเหลือในไบโอดีเซลในปริมาณสูงกว่ากำหนด ส่งผลให้ความหนืดของไบโอดีเซลมีค่าสูง



ภาพที่ 2.2 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ผ่านการใช้งานแล้ว

- ความหนาแน่น มาตรฐานกำหนดให้ความหนาแน่นของไบโอดีเซล ณ อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส มีค่าไม่ต่ำกว่า 860 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรและไม่เกิน 900 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความหนาแน่นเป็นสมบัติที่สำคัญที่ใช้ในการออกแบบระบบหัวฉีดจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล ค่าความหนาแน่นเป็นตัวบ่งบอกถึงปริมาณของพลังงานเชื้อเพลิง เมื่อค่าความหนาแน่นของน้ำมันมีค่ามากก็จะให้พลังงานความร้อนมากเมื่อเทียบกับปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงในปริมาณเดียวกัน ความหนาแน่นของไบโอดีเซลจากวัตถุดิบน้ำมันพืชแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกัน นอกจากนี้ปริมาณเมทานอลที่ตกค้างในไบโอดีเซลยังเป็นสาเหตุให้ความหนาแน่นมีค่าต่ำ

- ความหนืด มาตรฐานกำหนดให้ความหนืดของไบโอดีเซล ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส มีค่าไม่ต่ำกว่า 3.5 เซนติสโตกส์ และไม่สูงกว่า 5 เซนติสโตกส์ ความหนืดเป็นสมบัติที่เกี่ยวข้องกับการไหลและการฉีดน้ำมันเป็นฝอยของหัวฉีดในท้องเผาไหม้ การฉีดน้ำมันให้เป็นฝอยขนาดเล็กจะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ความหนืดของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันพืชที่เป็นวัตถุดิบ นอกจากนี้ความหนืดยังเป็นดัชนีแสดงการเสื่อมสภาพของไบโอดีเซลเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันอีกทางหนึ่ง

- จุลวาบไฟ มาตรฐานกำหนดให้จุลวาบไฟของไบโอดีเซลมีค่ามากกว่า 120 องศาเซลเซียส จุลวาบไฟเป็นค่าอุณหภูมิต่ำสุดเมื่อเปลวไฟผ่านเหนือไอของน้ำมันแล้วทำให้น้ำมันติดไฟ จุลวาบไฟมีผลต่อการขนส่ง การเคลื่อนย้ายและการจัดเก็บ ปริมาณเมทานอลที่ยังคงเหลืออยู่ในไบโอดีเซลในปริมาณที่มากกว่าร้อยละ 0.2 จะส่งผลให้จุลวาบไฟมีค่าต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส

- ปริมาณกำมะถัน มาตรฐานกำหนดให้ปริมาณกำมะถันในไบโอดีเซลมีค่าไม่สูงกว่าร้อยละ 0.001 โดยน้ำหนัก กำมะถันในน้ำมันที่ถูกเผาไหม้จะเปลี่ยนเป็นแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งถูกปล่อยออกมาพร้อมไอเสียจากเครื่องยนต์และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตามไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงที่มีปริมาณกำมะถันต่ำ เนื่องจากน้ำมันพืชที่ใช้ในการผลิตมักมีองค์ประกอบของกำมะถันต่ำกว่า 15 ส่วนในล้านส่วน การเผาไหม้ของไบโอดีเซลจึงปล่อยแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกสู่สิ่งแวดล้อมน้อย

- ปริมาณกากถ่าน มาตรฐานกำหนดให้มีปริมาณกากถ่านในไบโอดีเซลร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของกากที่เหลือจากการกลั่นไม่สูงกว่าร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก ปริมาณกากถ่านมีความสัมพันธ์กับปริมาณกลีเซอไรด์ กรดไขมันอิสระ สบู่และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ยังหลงเหลืออยู่ในไบโอดีเซล หากไบโอดีเซลมีปริมาณกากถ่านสูงกว่ามาตรฐานแสดงว่าไบโอดีเซลมีสารต่างๆ เหล่านี้เจือปนอยู่มาก นอกจากนี้ปริมาณกากถ่านยังแสดงถึงแนวโน้มของปริมาณกากถ่านที่เหลืออยู่หลังจากการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์ กากถ่านในห้องเผาไหม้มีผลต่อการอุดตันในหัวฉีดหรือที่ลูกสูบ ทำให้กำลังของเครื่องยนต์ลดลง เครื่องยนต์สกปรกและต้องเปลี่ยนถ่ายน้ำมันเครื่องบ่อยครั้ง

- ปริมาณเถ้าซัลเฟต มาตรฐานกำหนดให้ปริมาณเถ้าซัลเฟตในไบโอดีเซลไม่สูงกว่าร้อยละ 0.02 โดยน้ำหนัก เถ้าซัลเฟตเกิดจากการเผาไหม้ของสารปนเปื้อนในไบโอดีเซล เนื่องมาจากการตกค้างของสบู่และตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณเถ้าซัลเฟตมีผลต่อการอุดตันในเครื่องยนต์

- ปริมาณน้ำ มาตรฐานกำหนดให้ปริมาณน้ำในไบโอดีเซลไม่สูงกว่าร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก น้ำในไบโอดีเซลจะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ นอกจากนี้น้ำในไบโอดีเซลยังเป็นสาเหตุให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสระหว่างน้ำกับเอสเทอร์เกิดเป็นกรดไขมันอิสระส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนเครื่องยนต์ นอกจากนี้น้ำยังเป็นตัวเร่งให้เกิดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในถังเก็บน้ำมันซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้หัวฉีดอุดตัน

- ปริมาณสิ่งปนเปื้อนทั้งหมด มาตรฐานกำหนดให้ปริมาณสิ่งปนเปื้อนทั้งหมดในไบโอดีเซลไม่สูงกว่าร้อยละ 0.0024 โดยน้ำหนัก สิ่งปนเปื้อนในน้ำมันไบโอดีเซลส่วนใหญ่เป็นผลมาจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันและปฏิกิริยาข้างเคียง เช่น ปฏิกิริยาการเกิดสบู่ของกรดไขมันอิสระและตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส ตัวเร่งปฏิกิริยาที่แยกออกมาไม่หมดและสารที่ไม่ใช่สบู่ ได้แก่ ไขมันที่ไม่อยู่ในรูปของกลีเซอไรด์ กรดไขมันอิสระ สารประกอบไฮโดรคาร์บอน สารประกอบแคโรทีน วิตามินและอื่นๆ ขึ้นอยู่กับสมบัติของวัตถุดิบน้ำมันพืชเริ่มต้น โดยทั่วไปสิ่งปนเปื้อนทั้งหมดจะถูกกำจัดออกจากไบโอดีเซลในขั้นตอนการล้างน้ำ สิ่งปนเปื้อนในไบโอดีเซลมีผลเสียต่อเครื่องยนต์หลายด้าน เช่น สมบัติด้านความเสถียรของไบโอดีเซลระหว่างการเก็บรักษา เนื่องจากสารประกอบของสารที่ไม่ใช่สบู่เปลี่ยนสภาพกลายเป็นสารที่มีผลในการลดความเสถียรของไบโอดีเซล

- การกักกรองแผ่นทองแดง มาตรฐานกำหนดให้ค่าการกักกรองแผ่นทองแดงของไบโอดีเซล ไม่สูงกว่าหมายเลข 1 ค่าการกักกรองแผ่นทองแดงแสดงถึงการกักกรองของน้ำมันต่อโลหะที่ใช้เป็น ชิ้นส่วนในเครื่องยนต์ดีเซล เนื่องจากปริมาณกรด เช่น กรดไขมันอิสระ และสารประกอบซัลเฟอร์ใน น้ำมัน ซึ่งค่าการกักกรองนี้มีผลต่อการทำงานของเครื่องยนต์

- ค่าความเป็นกรด มาตรฐานกำหนดให้ค่าความเป็นกรดในไบโอดีเซลไม่สูงกว่า 0.5 มิลลิกรัม โฟแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อไบโอดีเซล 1 กรัม ค่าความเป็นกรดในไบโอดีเซลเกิดจากปริมาณกรด ไขมันอิสระในวัตถุดิบน้ำมันพืชและปริมาณกรดที่ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งมีผลต่อการกัก กรองในเครื่องยนต์ ทำให้อายุการใช้งานของปั๊มและไส้กรองน้ำมันลดลง นอกจากนี้ยังแสดงถึงการ เสื่อมสภาพของน้ำมัน เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจากปริมาณน้ำที่ปนอยู่ในน้ำมันและผลของ สภาวะในการจัดเก็บ

- ปริมาณกรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์ มาตรฐานกำหนดให้มีปริมาณกรดลิโนเลนิกเมทิล เอสเทอร์ไม่สูงกว่าร้อยละ 12 โดยน้ำหนักกรดลิโนเลนิกเป็นกรดไขมันที่มีพันธะคู่อยู่ในโครงสร้างถึง สามพันธะ ปริมาณกรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์แสดงถึงปริมาณพันธะคู่หรือความไม่อิ่มตัวของ ไบโอดีเซล ซึ่งพันธะคู่มีแนวโน้มทำให้เกิดพอลิเมอร์ในเครื่องยนต์ ทำให้เกิดการอุดตัน และการ เสื่อมสภาพของน้ำมันเครื่อง ปริมาณกรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันพืชที่เลือก มาใช้เป็นวัตถุดิบ

- เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน มาตรฐานกำหนดให้เสถียรภาพต่อการ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซลมีค่าไม่ต่ำกว่า 10 ชั่วโมง เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันจะทำ สมบัติของไบโอดีเซลเปลี่ยน โดยทำให้เกิดสารประเภทเปอร์ออกไซด์ขึ้นระหว่างพันธะคู่ของกรดไขมัน ไม่อิ่มตัวที่อยู่ในโครงสร้างของไบโอดีเซล ปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดเมื่อน้ำมันสัมผัสกับออกซิเจนใน อากาศ โดยที่ความร้อนและแสงแดดมีผลช่วยเร่งปฏิกิริยาเช่นเดียวกับโลหะ เช่น ทองแดงและตะกั่ว ก็เป็นตัวเร่งให้ปฏิกิริยาเกิดเร็วขึ้นได้เช่นกัน ผลของปฏิกิริยาทำให้เกิดสารพอลิเมอร์และเกิดของแข็งที่ ไม่ละลายน้ำในไบโอดีเซล เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันนอกจากจะขึ้นกับประเภทและ สมบัติของน้ำมันพืชที่เป็นวัตถุดิบแล้ว ยังขึ้นกับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลอีกด้วย โดยกระบวนการ ผลิตที่มีการให้ความร้อนสูงแก่ไบโอดีเซลเป็นระยะเวลาอันอาจส่งผลให้เสถียรภาพต่อการ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้

- ค่าไอโอดีน มาตรฐานกำหนดให้ค่าไอโอดีนของไบโอดีเซลไม่สูงกว่า 120 กรัมไอโอดีนต่อ 100 กรัมไบโอดีเซล แสดงถึงปริมาณพันธะคู่ในไบโอดีเซล ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของน้ำมันพืชที่ใช้เป็น วัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล ค่าไอโอดีนต่ำแสดงถึงการมีปริมาณกรดไขมันอิ่มตัวในโครงสร้าง ไบโอดีเซลสูง ทำให้มีแนวโน้มในการเกิดออกซิเดชันต่ำ นอกจากนี้ค่าไอโอดีนยังมีความสัมพันธ์กับจุด

ขุ่นซึ่งแสดงถึงอุณหภูมิที่น้ำมันเริ่มเกิดไขหรือจับตัวเป็นก้อนแข็ง ไบโอดีเซลที่มีค่าไอโอดีอินต่ำจะมีจุดขุ่นสูง

- ปริมาณเมทานอล มาตรฐานกำหนดให้มีปริมาณเมทานอลในไบโอดีเซลไม่สูงกว่าร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก เมทานอลเป็นสารตั้งต้นที่เหลือจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งจำเป็นต้องกำจัดออกให้หมดก่อนนำไปโอดีเซลออกจำหน่าย จึงต้องมีปริมาณต่ำในผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซล จุดวาบไฟขั้นต่ำของไบโอดีเซลคือ 130 องศาเซลเซียส เมทานอลมีค่าจุดวาบไฟต่ำกว่าไบโอดีเซลมาก ดังนั้นเมื่อมีเมทานอลปะปนอยู่ในไบโอดีเซลจะทำให้ไบโอดีเซลมีจุดวาบไฟต่ำลงด้วย ซึ่งมีผลต่อความปลอดภัยในการเก็บรักษา การขนส่งและการนำมาใช้ในเครื่องยนต์ เมทานอลที่มีค่าความเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 5 จะมีผลกระทบต่อค่าซีเทนและความหล่อลื่นของน้ำมัน

- ปริมาณมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ มาตรฐานกำหนดให้มีปริมาณมอนอกลิเซอไรด์ในไบโอดีเซลไม่สูงกว่าร้อยละ 0.8 โดยน้ำหนัก และกำหนดให้ปริมาณไดกลีเซอไรด์และไตรกลีเซอไรด์ไม่สูงกว่าร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก ปริมาณกลีเซอไรด์ทั้งสามประเภทเป็นตัวบ่งบอกถึงการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในการผลิตไบโอดีเซลว่าเกิดขึ้นโดยสมบูรณ์หรือไม่ ปริมาณมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ที่เหลือจากการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ไม่สมบูรณ์จะส่งผลให้เกิดการอุดตันบริเวณหัวฉีด กระบอกสูบ และวาล์วภายในเครื่องยนต์

- ปริมาณกลีเซอรินอิสระ มาตรฐานกำหนดให้มีปริมาณกลีเซอรินอิสระในไบโอดีเซลไม่สูงกว่าร้อยละ 0.02 โดยน้ำหนัก กลีเซอรินอิสระที่ยังหลงเหลืออยู่ในไบโอดีเซล เกิดขึ้นจากการแยกกลีเซอรินไม่สมบูรณ์ ทำให้มีปัญหาคาการแยกชั้นของกลีเซอรินในการจัดเก็บไบโอดีเซล รวมถึงการสะสมของกลีเซอรินที่บริเวณด้านล่างของถังน้ำมัน กลีเซอรินมีผลต่อการอุดตันที่หัวฉีดและระบบลำเลียงน้ำมัน

- ปริมาณกลีเซอรินทั้งหมด มาตรฐานกำหนดให้มีปริมาณกลีเซอรินทั้งหมดในไบโอดีเซลไม่สูงกว่าร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก ปริมาณกลีเซอรินทั้งหมดหมายถึงปริมาณของกลีเซอรินอิสระและกลีเซอรินในโมเลกุลมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ที่เจือปนในองค์ประกอบไบโอดีเซล ซึ่งเป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ไม่สมบูรณ์มีผลก่อให้เกิดการอุดตันที่บริเวณหัวฉีดและไส้กรอง และปัญหาการใช้งานในสภาพอากาศเย็น

- ปริมาณโลหะหมู่ 1 และ 2 มาตรฐานกำหนดให้มีปริมาณโลหะกลุ่ม 1 (โซเดียมและโพแทสเซียม) และโลหะกลุ่ม 2 (แคลเซียมและแมกนีเซียม) ในไบโอดีเซล อย่างละไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม การวัดปริมาณโลหะเป็นการวัดปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส สบู่ และโลหะหนักจากน้ำที่ใช้ในการล้างไบโอดีเซลที่หลงเหลือในผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซล

- ปริมาณฟอสฟอรัส มาตรฐานกำหนดให้มีปริมาณฟอสฟอรัสในไบโอดีเซลไม่สูงกว่าร้อยละ 0.001 โดยน้ำหนัก ฟอสฟอรัสเป็นสารที่ปนเปื้อนอยู่ในวัตถุดิบน้ำมันพืชตั้งแต่เริ่มต้น หากไม่ทำการ

กำจัดออกจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล จะทำให้ไบโอดีเซลที่ผลิตได้มีฟอสฟอรัสปะปนอยู่ด้วย ซึ่งจะทำให้ความเสียหายให้กับอุปกรณ์คะตะไลติกคอนเวอเตอร์ (Catalytic converter) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมการแพร่มลพิษเนื่องจากปัจจุบันมีกฎหมายห้ามการแพร่มลพิษที่เข้มงวดมากขึ้น อุปกรณ์คะตะไลติกคอนเวอเตอร์จึงเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญที่ใช้ในเครื่องยนต์ดีเซล [8]

2.1.4 กระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์

เนื่องจากไบโอดีเซลที่ได้จากกระบวนการผลิตจะมีการปนเปื้อนของสารต่าง ๆ ที่ออกมาจากไบโอดีเซล เช่น กลีเซอรอล เมทานอล สารจำพวกเอสเทอร์ กรดไขมัน น้ำ สบู่ และพวกโลหะบางชนิด ต้องกำจัดสารปนเปื้อนด้วยกระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ เพื่อให้ได้ไบโอดีเซลที่มีสมบัติตรงตามมาตรฐานกรมธุรกิจพลังงาน กระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์สามารถทำได้ 2 วิธี คือ การล้างแบบเปียก (Wet washing method) และการล้างแบบแห้ง (Dry washing method) [9]

ก. การล้างแบบเปียก (Wet washing method)

การล้างแบบเปียกทำได้โดยการนำไบโอดีเซลที่ได้จากกระบวนการผลิตไปล้างด้วยน้ำสะอาดหรือน้ำผสมกรดกำมะถันร้อยละ 1 จำนวน 20 กิโลกรัมต่อไบโอดีเซล 100 กิโลกรัม กวนให้เข้ากันประมาณ 1 ชั่วโมง และให้ความร้อนประมาณ 60-70 องศาเซลเซียส (หรือไม่ต้องให้ความร้อน) จากนั้นหยุดให้ความร้อนและตั้งทิ้งไว้ให้เกิดการแยกชั้น จากนั้นแยกไบโอดีเซลออกมาและล้างซ้ำอีก 2-3 ครั้ง หากใช้น้ำกรดล้างต้องล้างด้วยน้ำเปล่าในรอบสุดท้าย การล้างด้วยน้ำกรดจะช่วยป้องกันการเกิดสบู่ในขั้นตอนการล้าง ทำให้ปริมาณสบู่ลดลงได้เช่นเดียวกัน การล้างแบบเปียกเป็นวิธีที่นิยมใช้ในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพค่อนข้างสูงและสามารถกำจัดสิ่งเจือปนในไบโอดีเซลได้มาก เนื่องจากสารปนเปื้อนต่างๆ สามารถละลายในน้ำได้ดีกว่าในไบโอดีเซล แต่วิธีดังกล่าวมีข้อเสีย คือ การล้างไบโอดีเซลก่อให้เกิดน้ำเสียปริมาณมากถึงร้อยละ 20 โดยปริมาตรซึ่งลักษณะสีขาวขุ่นคล้ายนมในปริมาณมาก น้ำเสียที่เกิดขึ้นอาจก่อให้เกิดปัญหาต่อระบบนิเวศหากไม่มีการบำบัดก่อนปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อม และมีการสูญเสียไบโอดีเซลไปกับน้ำล้างไบโอดีเซล ซึ่งเป็นการเพิ่มต้นทุนและระยะเวลาในการผลิต

ข. การล้างแบบแห้ง (Dry washing method)

การล้างแบบแห้ง เป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่ได้รับสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากการล้างแบบแห้งไม่ก่อให้เกิดน้ำเสียจากกระบวนการล้างและไม่ทิ้งสารตกค้างในไบโอดีเซลอีกด้วย ทำให้ไบโอดีเซลที่ได้มีคุณภาพสูงขึ้น กระบวนการล้างแบบแห้งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) และ การดูดซับด้วยตัวดูดซับ (Adsorption)

- การแลกเปลี่ยนไอออน เป็นกระบวนการแยกสารให้บริสุทธิ์และกระบวนการลดปริมาณสารปนเปื้อนโดยเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างอะตอมของไฮโดรเจนในเรซินกับสารเจือปนในไบโอดีเซล เรซินที่นิยมใช้มีลักษณะเป็นเม็ดสีขาวหรือสีเหลือง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1-2 มิลลิเมตร ผลิตจากสารพอลิเมอร์ ในการใช้งานอาจมีการเพิ่มรูพรุนของโครงสร้างของตัวดูดซับหรืออาจมีการเพิ่มที่ผิวของตัวดูดซับ เพื่อให้สามารถดูดซับสารเจือปนได้เพิ่มขึ้น ชนิดของการแลกเปลี่ยนไอออนขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนให้ตรงกับความต้องการได้

- การดูดซับด้วยตัวดูดซับ เป็นกระบวนการกักเก็บสารแขวนลอยหรือสารละลายขนาดเล็กที่อยู่ในของเหลวให้อยู่บนผิวของสารอีกชนิดหนึ่ง โดยสารแขวนลอยหรือสารละลายขนาดเล็กจะถูกดูดซับที่ผิวของสารดูดซับ การดูดซับที่ผิวนี้จะเป็นการดูดซับระหว่างสถานะมีทั้งแบบแก๊ส-ของแข็ง และของเหลว-ของแข็ง โมเลกุลของสารส่วนใหญ่จะถูกจับอยู่กับผิวภายในโพรงของตัวดูดซับและมีเพียงบางโมเลกุลของสารเท่านั้นที่ติดอยู่ผิวนอก การถ่ายเทโมเลกุลจากตัวถูกดูดซับไปหาตัวดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงสมดุลจึงหยุด ณ จุดสมดุล ความเข้มข้นของโมเลกุลในตัวถูกดูดซับจะเหลือน้อยเพราะโมเลกุลส่วนใหญ่เคลื่อนที่ไปจับอยู่กับตัวดูดซับ

2.2 การดูดซับ

การดูดซับ เป็นกระบวนการดึงโมเลกุลของสารเข้ามาติดผิวของตัวดูดซับที่เกิดขึ้นระหว่างเฟส 2 เฟส โดยเกิดที่พื้นที่ผิวสัมผัส (Interface) ซึ่งเป็นพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของเหลวกับของเหลว ของเหลวกับแก๊ส ของแข็งกับแก๊ส และของแข็งกับของเหลว สารที่เกิดการดูดซับที่พื้นผิว เรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) ส่วนสารที่ถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) โดยปริมาณตัวดูดซับขึ้นอยู่กับอุณหภูมิสัมบูรณ์ ความดัน และพลังงานศักย์ของอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นในการดูดซับอาจเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ หรือแรงที่อยู่ในรูปของพันธะเคมี

2.2.1 พฤติกรรมการดูดซับของสาร

พฤติกรรมการดูดซับที่เกิดขึ้นระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ สามารถจำแนกได้เป็น 4 ชนิด คือ การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption) การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption) การดูดซับแลกเปลี่ยน (Exchange Adsorption) และการดูดซับแบบเจาะจง (Specific Adsorption)

ก. การดูดซับทางกายภาพ เป็นการดูดซับด้วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อนๆ และเป็นแรงที่ไม่กำหนดทิศทาง เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) หรือพันธะไฮโดรเจน ซึ่งมีทิศทางโดยไม่มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้อง ความร้อนของการดูดซับมีค่าน้อย การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากตัวดูดซับจะทำได้ง่ายและการดูดซับอาจเกิดขึ้นกันแบบหลายชั้น (Multilayer)

ข. การดูดซับทางเคมี เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นระหว่างตัวถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ โดยเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้น ส่งผลให้มีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิม แล้วมีการจัดเรียงอะตอมใหม่เป็นสารประกอบใหม่ขึ้นมา พันธะระหว่างอะตอมมักจะแข็งแรง มีพันธะกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องและมีการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer)

ค. การดูดซับแบบแลกเปลี่ยน เกิดขึ้นเมื่อตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมีประจุและเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับที่มีประจุตรงกันข้ามหรือเกิดเนื่องจากการแทนที่ประจุที่อยู่บนผิวของตัวดูดซับด้วยไอออนของตัวถูกดูดซับ

ง. การดูดซับแบบเจาะจง เกิดขึ้นเนื่องจากมีแรงยึดเหนี่ยวของโมเลกุลตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับที่มีหมู่ฟังก์ชันอยู่บนผิว แต่ไม่ได้มีผลทำให้ตัวถูกดูดซับเปลี่ยนโครงสร้างไป พฤติกรรมการดูดซับชนิดนี้จะมีพลังงานในการยึดเหนี่ยวอยู่ระหว่างพลังงานของการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี ในการดูดซับที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบการดูดซับทางกายภาพ การดูดซับเคมี การดูดซับแลกเปลี่ยน หรือการดูดซับแบบเจาะจงขึ้นอยู่กับชนิดของคู่ตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับนั้น

2.2.2 กลไกการดูดซับ

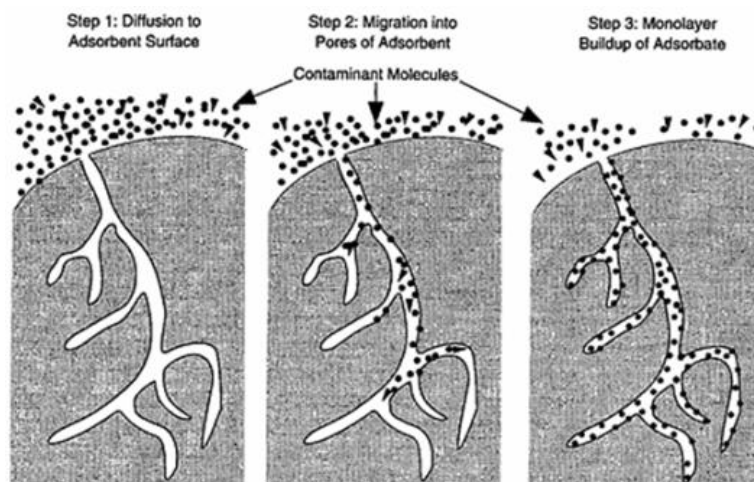
การดูดซับ เป็นกลไกสำคัญที่ทำให้สารแขวนลอยสามารถเกาะจับอยู่บนสารกรองหรือบนสิ่งอื่นที่จับบนสารกรองอยู่ก่อนแล้ว คอลลอยด์และสารกรองมักจะมีประจุลบ ทั้งคู่มีความสามารถในการดูดซับขึ้นอยู่กับชนิดของสารที่ทำหน้าที่ดูดซับ สารที่นิยมใช้กัน ได้แก่ ถ่าน ถ่านกัมมันต์ เป็นต้น ขั้นตอนที่เกิดขึ้นในการดูดซับมี 4 ขั้นตอน ดังนี้

ก. การเคลื่อนที่ของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าหาคาร์บอนหรือตัวดูดซับ ในกรณีของคาร์บอนแบบผง การเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการกวนสารจนทำให้เกิดความปั่นป่วน แต่ในกรณีของคาร์บอนแบบเกล็ดการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นมีกลไกเช่นเดียวกับที่เกิดขึ้นในเครื่องกรองน้ำ

ข. การแพร่ในชั้นฟิล์ม (Film diffusion) เมื่อโมเลกุลของตัวถูกละลายเข้ามาถึงคาร์บอน ซึ่งตามปกติมีฟิล์มห่อหุ้มอยู่โดยรอบคล้ายเยื่อต่างๆ โมเลกุลต้องแทรกตัวผ่านฟิล์มให้ได้จึงจะเข้าถึงผิวคาร์บอนได้ แสดงดังภาพที่ 2.3

ค. การแพร่ในรูพรุน (Pore diffusion) เนื่องจากคาร์บอนมีพื้นที่ส่วนใหญ่อยู่ที่โพรงหรือช่องว่างภายในโมเลกุลของตัวถูกละลาย จึงต้องแทรกตัวเข้าไปถึงช่องว่างภายในคาร์บอนจึงจะมีการดูดซับเกิดขึ้น

ง. โมเลกุลต้องเกาะติดบนผิวคาร์บอนโดยไม่หลุดออกจากผิวคาร์บอน [5]



ภาพที่ 2.3 กลไกการดูดซับสารปนเปื้อนบนพื้นผิวของตัวดูดซับที่มีรูพรุน

2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสารของตัวดูดซับสามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเด็น ได้แก่ สมบัติของตัวถูกดูดซับ สมบัติของตัวดูดซับและชนิดของตัวดูดซับ กล่าวคือ

ก. สมบัติของตัวถูกดูดซับ ได้แก่

- น้ำหนักและขนาดโมเลกุล เช่น เมื่อน้ำหนักและขนาดโมเลกุลเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับก็จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มน้ำหนักและขนาดโมเลกุลจะส่งผลให้ความสามารถในการละลายลดลง

- การละลายของตัวถูกดูดซับ เช่น ความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่อความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น เนื่องจากก่อนที่จะเกิดกระบวนการดูดซับขึ้นจะต้องมีการทำลายพันธะระหว่างตัวถูกละลายและตัวทำละลายก่อน

- สภาพขี้ของตัวถูกดูดซับ เช่น ตัวดูดซับมีสภาพขี้เพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง เนื่องจากการเพิ่มสภาพขี้จะทำให้เกิดการละลายได้มากขึ้น

ข. สมบัติของตัวดูดซับ ได้แก่

- พื้นที่ผิว เป็นสมบัติเฉพาะตัวที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับ ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับ

- ขนาดรูพรุน เป็นสมบัติที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับให้มากขึ้น เพราะถ้าขนาดของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับสามารถเข้าไปในรูพรุนของสารดูดซับได้การดูดซับก็จะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าขนาดของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับใหญ่กว่ารูพรุน จะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง

- ขนาดตัวดูดซับ ในกรณีของตัวดูดซับที่ไม่มีรูพรุน ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของตัวดูดซับลดลง

- ชนิดและปริมาณหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวดูดซับ ตัวดูดซับที่มีชนิดและปริมาณหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวที่เหมาะสมกับชนิดของตัวถูกดูดซับ ประสิทธิภาพในการดูดซับจะสูงขึ้น

ค. สมบัติของสารละลาย ได้แก่

- อุณหภูมิของสารละลาย กล่าวคือ การดูดซับจะเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการแพร่ผ่านของโมเลกุลของสารจากสารละลายจะเพิ่มขึ้น ทำให้การดูดซับเพิ่มขึ้น

- ค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ของสารละลาย กล่าวคือ ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อความเป็นกรดของสารละลายเพิ่มขึ้น

2.2.4 ชนิดของตัวดูดซับ

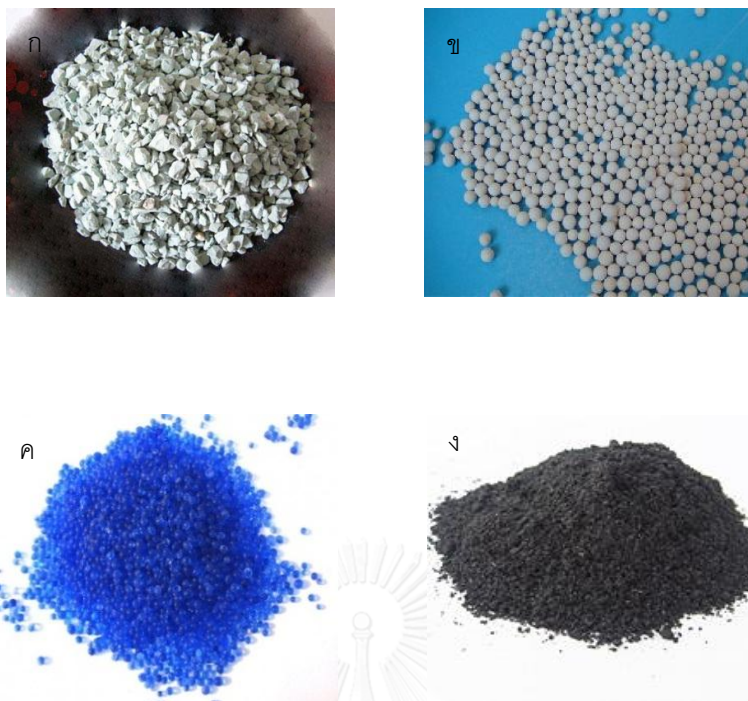
ตัวดูดซับ หมายถึง สารที่สามารถดูดซับสารอื่นไว้บนผิวได้ปริมาณมาก ลักษณะและความมีขั้วของผิวของตัวดูดซับมีผลต่อความสามารถในการดูดซับ ตัวดูดซับสามารถจำแนกได้เป็น 2 ชนิด คือ ชนิดมีขั้ว ได้แก่ ซีโอไลท์ (Zeolite) อะลูมินากัมมันต์ (Activated alumina, Al_2O_3) ซิลิกาเจล (Silica gel, SiO_2) เป็นต้น และชนิดไม่มีขั้ว ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) สารพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวด (Super absorbent polymer - SAP) เป็นต้น ชนิดและสมบัติของตัวดูดซับที่นิยมใช้งานมีดังนี้ (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2544)

2.2.1 ซีโอไลท์ เป็นสารประกอบของอะลูมิโนซิลิเกต (Alumino silicate) ดังภาพที่ 2.4 (ก) นิยมใช้เป็นตัวดูดซับเพื่อทำน้ำให้บริสุทธิ์โดยการดูดซับความชื้นและกลิ่น รวมทั้งแยกไอออนของแอมโมเนียหรือธาตุของโลหะหนักออกจากน้ำและสารสังเคราะห์ เนื่องจากมีความจำเพาะในการดูดซับสูงมาก สามารถดูดซับสารที่ขนาดเล็กกว่า 4 อังสตรอม โดยทั่วไปสามารถเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติพบในประเทศญี่ปุ่นและประเทศไต้หวัน

2.2.2 อะลูมินากัมมันต์ สังเคราะห์ขึ้นจากอะลูมินาไฮเดรต ($Al_2O_3 \cdot 3H_2O$) ดังภาพที่ 2.4 (ข) โดยกำจัดน้ำออกจะได้อะลูมินากัมมันต์ มีพื้นที่ผิวประมาณ 150-500 ตารางเมตรต่อกรัม นิยมใช้เพื่อดูดซับความชื้น หรือแก๊สที่มีขั้วออกจากแก๊สไฮโดรคาร์บอน

2.2.3 ซิลิกาเจล สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate) ดังภาพที่ 2.4 (ค) กับกรดซิลฟิวริก หรือปฏิกิริยาการกำจัดน้ำออกจากกรดซิลิซิก (Silicic acid) นิยมใช้เพื่อดูดความชื้นออกจากแก๊ส

2.2.4 ถ่านกัมมันต์ ผลิตจากวัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ ดังภาพที่ 2.4 (ง) เช่น กะลาปาล์ม เปลือกมังคุด เปลือกทุเรียน เป็นต้น เป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวสูงมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งความสามารถในการดูดซับไนโตรเจนสูงมาก เพราะว่ามีรูเล็กๆ (Microporosity) จำนวนมาก และสามารถเพิ่มพลังการดูดซับได้อีกโดยใช้สารเคมีในการปรับสภาพพื้นผิวของตัวดูดซับ



ภาพที่ 2.4 ตัวดูดซับ (ก) ซีโอไลท์ (ข) อะลูมินากัมมันต์ (ค) ซิลิกาเจล (ง) ถ่านกัมมันต์

2.3 ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำวัตถุดิบทางธรรมชาติหรืออินทรีย์วัตถุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบมาผ่านกระบวนการก่อกัมมันต์ (Activation process) เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นผงสีดำ มีพื้นที่ผิวภายในและความพรุนสูง สามารถดูดซับสารต่างๆ ได้ นอกจากนี้ตามผิวของรูพรุนยังมีอิเล็กตรอนอิสระที่พร้อมจะแลกเปลี่ยนประจุ และยึดเหนี่ยวโมเลกุลของสารต่างๆ ได้อย่างดี มีการนำมาประยุกต์ในการบำบัดน้ำ โดยวัตถุดิบนั้นอาจเกิดขึ้นโดยธรรมชาติหรือได้จากการสังเคราะห์ขึ้น วัตถุดิบที่นิยมนำมาผลิตถ่านกัมมันต์ในระดับอุตสาหกรรม คือ ฟิต ถ่านหิน ลิกไนต์ เปลือกทุเรียน เปลือกมังคุด กะลามะพร้าว และไม้ ถ่านกัมมันต์เมื่อใช้หมดแล้วนำกลับมาใช้ได้อีก โดยการฟื้นฟูสภาพของถ่านกัมมันต์ (Regeneration) ถ่านกัมมันต์ที่ดีควรมีปริมาณสารระเหยต่ำ มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง ราคาถูก หาได้ง่าย และมีสมบัติคงที่

2.3.1 ชนิดของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ในเชิงพาณิชย์มี 4 แบบ ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ชนิดผง ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด และถ่านกัมมันต์ชนิดเส้นใย กล่าวคือ

ก. ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Powder activated carbon : PAC) ดังภาพที่ 2.5 (ก) ขนาดเล็กกว่า 0.18 มม. นิยมใช้เพื่อกำจัดสีออกจากน้ำตาลทรายขาวและน้ำดื่ม เป็นต้น

ข. ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด (Granular activated carbon : GAC) ดังภาพที่ 2.5 (ข) ขนาด 0.2 ถึง 0.5 มม. นิยมใช้เพื่อดูดซับแก๊สหรือของเหลว เช่น การฟอกอากาศให้บริสุทธิ์ การกำจัดซัลเฟอร์ออกจากแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์ เป็นต้น

ค. ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Pelleted activated carbon) ดังภาพที่ 2.5 (ค) ขนาด 0.8 ถึง 5.0 มม. มีความจำเพาะในการดูดซับสูงมากเนื่องจากมีรูพรุนขนาดเล็กและสม่ำเสมอ ลักษณะทั่วไปอาจเป็นผงหรือเป็นเม็ดก็ได้ มักใช้เพื่อดูดซับแก๊สไนโตรเจนหรือแก๊สออกซิเจนจากอากาศ

ง. ถ่านกัมมันต์ชนิดเส้นใย (Cloth and fibrea activated carbon) ดังภาพที่ 2.5 (ง) สังเคราะห์จากฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resin) พอลิไคริลิกเรซิน (Polyacrylic resin) วิสโคสเรยอน (Viscous rayon) นิยมใช้ผลิตหน้ากากหรือใช้ในการนำสารละลายที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่

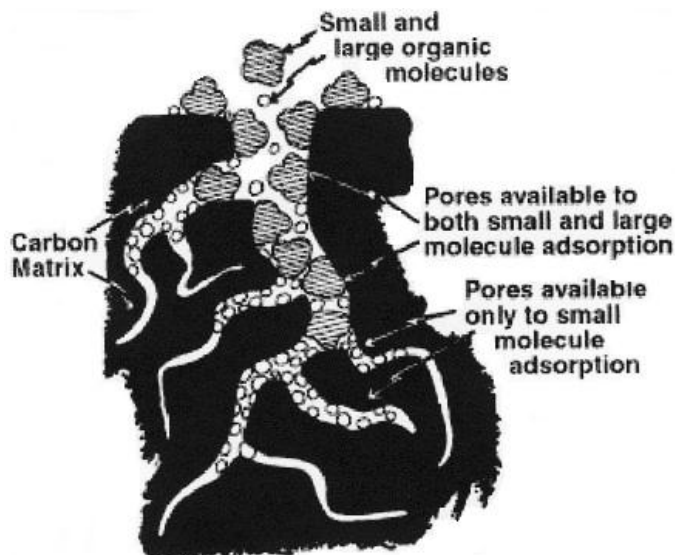


ภาพที่ 2.5 ชนิดของถ่านกัมมันต์ (ก) ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (ข) ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด (ค) ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด และ (ง) ถ่านกัมมันต์ชนิดเส้นใย

2.3.2 หลักการทำงานของถ่านกัมมันต์

การทำงานของถ่านกัมมันต์ใช้หลักการดูดซับและดูดซึมในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำ การดูดซับจะเป็นการจับกันอย่างหลวมๆ ของสารอินทรีย์และคาร์บอนที่ผิวของถ่านกัมมันต์ โดยยึดติดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์เป็นชั้นๆ ส่วนกระบวนการดูดซึมนั้นจะอาศัยหลักการแพร่ของแก๊สหรือสารประกอบเข้าไปในร่างแหของรูพรุนภายในเม็ดถ่านซึ่งภายในจะเกิดปฏิกิริยาเคมี ส่วนกระบวนการ

ดูดซึมอีกประเภท คือ การดูดซึมเข้าไปแล้วเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับไม่ได้สร้างพันธะที่แข็งแรงกับคาร์บอนของถ่านกัมมันต์ แสดงดังภาพที่ 2.6 [10]



ภาพที่ 2.6 แบบจำลองโครงสร้างภายในของถ่านกัมมันต์

2.3.3 การเตรียมถ่านกัมมันต์

การเตรียมถ่านกัมมันต์ คือ การทำให้คาร์บอนหรือถ่านมีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ด้วยวิธีการกระตุ้นเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวหรือการทำให้ผิวมีความว่องไวมากขึ้น การพิจารณาความหมายของการกระตุ้นมี 3 ลักษณะ คือ

- เพิ่มพื้นที่ผิวที่ว่องไว (Active surface area) โดยใช้ปฏิกิริยาเคมีทำให้โมเลกุลบางกลุ่มหลุดออกไป และเกิดส่วนที่มีอำนาจการดูดซับขึ้นมาแทน
- เพิ่มความว่องไวในการดูดซับให้ผิวที่มีอยู่แล้ว ซึ่งหมายถึงการทำให้อะตอมของคาร์บอนมีพลังงานศักย์สูงขึ้น โดยจัดการเปลี่ยนโครงสร้างใหม่ที่มีความว่องไวในการดูดซับสูงขึ้น
- กำจัดอินทรีย์วัตถุและอนินทรีย์วัตถุต่างๆ ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนออกจากบริเวณที่ทำหน้าที่ดูดซับ

กรรมวิธีการเตรียมถ่านกัมมันต์มีอยู่หลายวิธีขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้เป็นวัตถุดิบ ลักษณะและสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการ โดยทั่วไปกระบวนการเตรียมถ่านกัมมันต์ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ 2 ขั้นตอน คือ

ก. การคาร์บอนไนซ์ (Carbonization) เป็นกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) รูปแบบหนึ่ง โดยใช้ความร้อนทำให้สารระเหยแตกตัวและแทรกออกจากวัตถุดิบ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นของแข็งสีดำ เรียกว่า ถ่านชาร์ (Char) ส่วนที่หลุดออกมา คือ แก๊สและน้ำมันทาร์ กระบวนการคาร์บอนไนซ์เป็นการ

เพิ่มปริมาณร้อยละของคาร์บอนคงตัวให้สูงขึ้น การคาร์บอนไนซ์ทำให้ได้ถ่านที่มีสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ ตัวแปรที่สำคัญในการคาร์บอนไนซ์ คือ อุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อน และเวลาในการคาร์บอนไนซ์

ข. การกระตุ้นถ่านกัมมันต์ เป็นการทำให้ผิวถ่านชาร์เกิดรูพรุนขนาดต่างๆ ด้วยสารกระตุ้น อาจเป็นได้ทั้งไอน้ำ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หรือสารเคมีอื่น เช่น ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เป็นต้น

2.3.4 การกระตุ้นถ่านกัมมันต์

การกระตุ้นเป็นการทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพสำหรับคาร์บอนเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวให้มากขึ้น โดยการทำให้มีรูพรุนมากขึ้น แบ่งได้ 2 วิธี

ก. การกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation) เป็นการเพิ่มปริมาตรรูพรุนและพื้นที่ผิวโดยปฏิกิริยาเคมี กระบวนการกระตุ้นชนิดนี้นิยมใช้วัตถุดิบเป็นเปลือกผลไม้ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เช่น กะลามะพร้าว เปลือกทุเรียน เปลือกมังคุด เป็นต้น อุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นอยู่ในช่วง 150-900 องศาเซลเซียส และสารกระตุ้นที่นิยมใช้ทั่วไปในทางอุตสาหกรรม เช่น แคลเซียมคลอไรด์ ซิงค์คลอไรด์ กรดฟอสฟอริก และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น ซึ่งสามารถแทรกซึมได้ทั่วถึง ทำให้ส่วนที่ไม่บริสุทธิ์ละลายหมดไปได้เร็วขึ้นจากนั้นนำไปกระตุ้นโดยการทำคาร์บอนไนซ์ด้วยความร้อนในที่อับอากาศภายใต้แก๊สไนโตรเจนเป็นเวลาหลายชั่วโมง ข้อเสียของการกระตุ้นด้วยสารเคมี คือ อาจมีการตกค้างของสารเคมีในถ่านกัมมันต์จึงต้องล้างสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้นซึ่งติดมากับถ่านกัมมันต์ออกให้หมด เป็นการเพิ่มต้นทุนในการผลิต เนื่องจากต้องใช้สารเคมีในการล้างถ่านกัมมันต์ แต่เพื่อความปลอดภัยในการนำไปใช้ ปัจจุบันนิยมใช้วิธีการกระตุ้นทางเคมีมากกว่า ข้อดีของการกระตุ้นทางเคมี คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นต่ำและใช้เวลาน้อย (Lillo Rodenas, et al., 2007) ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง มีรูพรุนขนาดเล็ก และมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน ช่วยลดการเกิดทาร์และสารอื่นๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการ ร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงค่อนข้างสูง

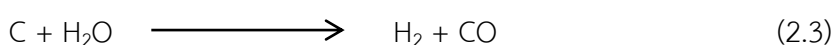
ตัวอย่างสารเคมีที่ใช้กระตุ้น มีดังนี้

- ซิงค์คลอไรด์ โดยใช้สารละลายซิงค์คลอไรด์ผสมกับวัตถุดิบโดยใช้ภาวะที่อุณหภูมิประมาณ 130 องศาเซลเซียส และกระตุ้นที่อุณหภูมิ 600-850 องศาเซลเซียส แต่ซิงค์คลอไรด์จะไม่นิยมนำมาใช้ในการกระตุ้นมากนัก เนื่องจากซิงค์คลอไรด์เกิดการกัดกร่อนเตาเผาและไม่สามารถผ่านกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ได้

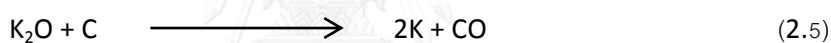
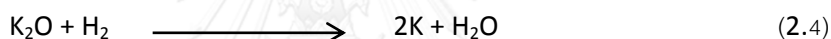
- กรดฟอสฟอริก การกระตุ้นโดยใช้กรดฟอสฟอริกเป็นสารกระตุ้นจะใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นค่อนข้างต่ำคือ 400-500 องศาเซลเซียส เนื่องจากกรดฟอสฟอริกสามารถผ่าน

กระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ โดยยังได้กรดฟอสฟอริกที่มีความเข้มข้นสูง วัตถุดิบที่เหมาะสมกับการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก คือ ไม้

- โพลีเอทิลีนไฮดรอกไซด์ เมื่อนำวัตถุดิบที่ต้องการทำเป็นถ่านกัมมันต์มาผสมกับสารละลายที่มีโพลีเอทิลีนไฮดรอกไซด์ ธาตุดังกล่าวจะแทรกเข้าไปอยู่ธาตุดังกล่าวจะแทรกเข้าไปอยู่ในโครงสร้างของวัตถุดิบ และเมื่อให้ความร้อนมากขึ้นโพลีเอทิลีนไฮดรอกไซด์ ก็จะแทรกเข้าไปในรูพรุนมากขึ้น ส่งผลให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่พื้นที่ผิวสูง แสดงดังนี้



สมการที่ (2.2) และ (2.3) แสดงการสลายตัวของโพลีเอทิลีนไฮดรอกไซด์เกิดเป็นโพลีเอทิลีนออกไซด์ (K_2O) และน้ำ ซึ่งเป็นสารทำให้คาร์บอนในถ่านหินเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิเคชัน จากนั้นโพลีเอทิลีนออกไซด์ถูกรีดิวซ์ด้วยไฮโดรเจนหรือคาร์บอนกลายเป็นโลหะโพแทสเซียม ดังสมการที่ (2.4) และ (2.5) ตามลำดับ



โพลีเอทิลีนจะอ่อนตัวที่อุณหภูมิสูงและแทรกเข้าไปในชั้นของอะตอมคาร์บอนทำให้เกิดรูพรุนได้มากขึ้น (Otowa, Tanibata and Itoh, 1993)

ข. การกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation) เป็นการกระตุ้นโดยใช้แก๊สหรือไอน้ำ ซึ่งใช้อุณหภูมิในการเผากระตุ้นค่อนข้างสูงประมาณ 800-1,000 องศาเซลเซียส เพราะไอน้ำที่ใช้จะต้องเป็นไอน้ำที่ร้อนยิ่งยวด (Superheated steam) เพื่อให้สารอินทรีย์ต่างๆ สลายไป ทำให้โครงสร้างภายในมีลักษณะรูพรุน ขนาดของรูพรุนทั่วไปจะมีขนาดเล็กกว่าการกระตุ้นทางเคมี ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่ผลิตด้วยวิธีนี้มีข้อดีที่สามารถนำไปใช้งานได้เลยทันที โดยไม่ต้องล้างสารที่เหลือตกค้าง

ค. การกระตุ้นด้วยไอน้ำในเตาเผาที่หมุนได้ (Rotary kiln) เตาเผาจะอยู่ในแนวนอนและหมุนได้รอบตัวโดยใช้มอเตอร์ ซึ่งจะทำให้ถ่านคลุกเคล้ากับไอน้ำได้มากขึ้น ไอน้ำที่ออกมาจากเครื่องทำไอน้ำจะถูกทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น โดยผ่านเข้าไปในท่อทองแดงแล้วเข้าเตาเผาที่หมุน ซึ่งก็จะทำปฏิกิริยากับถ่าน

ปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของความพรุนของถ่านกัมมันต์ ได้แก่ อัตราส่วนของลิกนินต่อเซลลูโลสในวัตถุดิบ อัตราการให้ความร้อน อุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น และอัตราส่วนของสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ

ดัชนีที่ใช้วัดคุณภาพของถ่านกัมมันต์ ได้แก่ เลขไอโอดีน (Iodine number) เลขฟินอล (Phenol number) การดูดซับเมทิลีนบลู การดูดซับไอออนของโลหะหนัก และพื้นที่ผิวจำเพาะ (surface area)

2.3.5 การทดสอบสมบัติของถ่านกัมมันต์

- ไอโอดีนนัมเบอร์ (Iodine number) เป็นค่าที่บอกประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์เนื่องจากถ่านสามารถดูดซับไอโอดีนได้ดี ดังนั้นค่าการดูดซับไอโอดีนจึงเป็นตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ หน่วยวัดเป็นมิลลิกรัม (ของไอโอดีน) ต่อน้ำหนักถ่าน 1 กรัม

- โมลาสนัมเบอร์ (Molass number) เป็นค่าที่บอกปริมาณรูพรุนขนาดใหญ่ มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 20 อังสตรอม (หรือมากกว่า 2 นาโนเมตร) ที่มีอยู่ในถ่านกัมมันต์ โดยถ่านกัมมันต์ที่มีค่าโมลาสนัมเบอร์สูงจะดูดซับสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น สีได้ดีกว่าถ่านกัมมันต์ที่มีค่าโมลาสนัมเบอร์ต่ำ

- เมทิลีนบลู (Methylene blue) แสดงความสามารถของถ่านกัมมันต์ในการดูดซับสารที่มีโมเลกุลขนาดกลาง ค่าเมทิลีนบลูมีหน่วยเป็นน้ำหนักกรัมต่อ 100 กรัม (g/100g)

- ความหนาแน่น (Apparent density) ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพควรมีความหนาแน่นสูงเนื่องจากความสามารถในการดูดซับขึ้นกับความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์

- ค่าความแข็งหรือค่าการขัดถู (Hardness/Abrasion number) ค่านี้บ่งชี้ถึงความสามารถในการทนต่อแรงเสียดสี และความสามารถในการคงสภาพของถ่านกัมมันต์ที่มีต่อกระบวนการล้างวัสดุกรอง (backwashing) ซึ่งค่านี้จะแตกต่างกันอย่างชัดเจนตามชนิดวัสดุและระดับที่ถ่านถูกกระตุ้น

- ปริมาณเถ้า (Ash content) แสดงถึงประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ โดยถ้าปริมาณเถ้ามากขึ้นประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านกัมมันต์จะลดลง

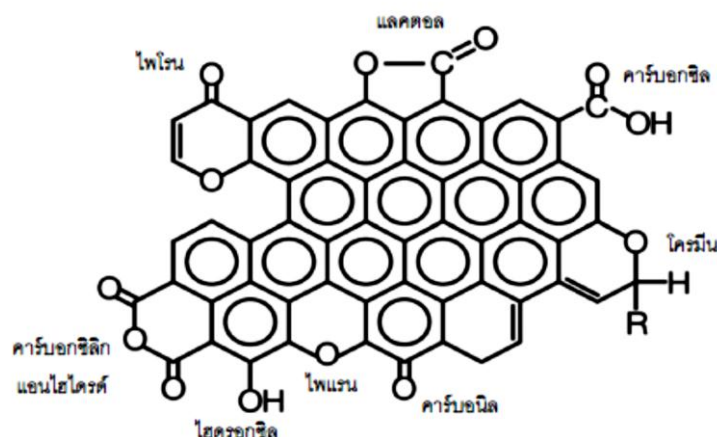
- ระดับคาร์บอนเตตระคลอไรด์ (Carbon tetrachloride activity) วิธีการหาความพรุนของถ่านกัมมันต์โดยดูจากค่าการดูดซับไอโอดีนตัวของสารคาร์บอนเตตระคลอไรด์

- ค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคถ่าน (Particle size distribution) บ่งชี้ถึงความละเอียดของผงถ่านกัมมันต์ พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์มากขึ้นเมื่อถ่านกัมมันต์มีความละเอียดมาก ทำให้โมเลกุลแก๊สถูกดูดซับเข้าไปในโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ได้เร็วขึ้น [11]

2.3.6 หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์

นอกจากปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับสารปนเปื้อนของถ่านกัมมันต์แล้ว ยังขึ้นอยู่กับลักษณะและหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ [12] โดยเฉพาะหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจน (Oxygen containing surface functional groups) กล่าวคือ ถ้าพื้นผิวของ

ถ่านกัมมันต์เป็นเพียงระนาบพื้นฐานที่ไม่มีหมู่ฟังก์ชัน ถ่านกัมมันต์ดังกล่าวสามารถดูดซับสารได้ แต่การดูดซับไม่แข็งแรงสารที่ถูกดูดซับจะหลุดออกง่าย เนื่องจากการดูดซับเกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์เพียงอย่างเดียว ซึ่งเป็นแรงยึดเหนี่ยวที่ค่อนข้างอ่อน แต่ถ้ามีหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ การดูดซับจะแข็งแรงกว่าหรือมีพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ โอกาสที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะหลุดออกจึงมีน้อยกว่า



ภาพที่ 2.7 หมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์บนขอบของระนาบชั้นแกรไฟิน

ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์เกิดจากอิเล็กตรอนอิสระซึ่งอยู่ในสถานะที่ไม่เสถียรพยายามที่จะเกาะกับอะตอมหรือโมเลกุลอื่น เช่น ออกซิเจนในอากาศหรืออะตอมที่อยู่ในสารตั้งต้น กระบวนการกระตุ้นจะก่อให้เกิดหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่แตกต่างกันหลายหมื่นขอบ (Edge) ของระนาบชั้นแกรไฟิน [13] ดังแสดงในภาพที่ 2.8 โดยถ่านกัมมันต์ที่มีสภาพผิวเป็นเบส (Basic oxygen functional groups) จะปรากฏหมู่ฟังก์ชันของคาร์บอนิล (Carbonyl) โครมีน (Chromene) ไพแรน (Pyran) อีเทอร์ (Ether) และแลคโตน (Lactone) โดยมีความสามารถในการดูดซับตัวถูกดูดซับที่มีประจุลบ (Negative charge) [14] ส่วนถ่านกัมมันต์ที่มีสภาพพื้นผิวเป็นกรด (Acidic oxygen functional groups) จะปรากฏหมู่ฟังก์ชันของคาร์บอกซิล (Carboxyl) ไฮดรอกซิล (Hydroxyl) แลคโตน (Lactone) และคาร์บอกซิลิกแอนไฮไดรด์ (Carboxylic anhydride) ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับตัวถูกดูดซับที่มีประจุบวก (Positive charge) ปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ คือ อัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของสารกระตุ้นและถ่านชาร์ และอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันแต่ละชนิดจะเกิดการสลายตัวที่อัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของสารกระตุ้นและถ่านชาร์และอุณหภูมิสูงแตกต่างกัน กล่าวคือ หมู่คาร์บอกซิลและหมู่แลคโตนจะสลายตัวเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และฟีนอล (Phenol) ที่อุณหภูมิ 200 - 700 องศาเซลเซียส หมู่คาร์บอนิลและอนุพันธ์ของหมู่คาร์บอนิลจะสลายตัวเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide) ที่อุณหภูมิ 500 - 1,000 องศาเซลเซียส และหมู่ไฮดรอกซิลจะ

สลายตัวเป็นโมเลกุลของน้ำ ในช่วงอุณหภูมิ 200 - 500 องศาเซลเซียส [15] ส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงปริมาณหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์แตกต่างกันเมื่ออุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์แตกต่างกัน ดังนั้นเมื่อหมู่ฟังก์ชันบนผิวของถ่านกัมมันต์มีการเปลี่ยนแปลงให้มีความเฉพาะเจาะจงมากขึ้นก็จะทำให้ลดปริมาณการใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับ ซึ่งจะเป็นการลดขนาดของระบบบำบัดและลดการสูญเสียถ่านกัมมันต์ [16]

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Berrios และ Skelton [17] เปรียบเทียบประสิทธิภาพของการล้างไบโอดีเซล 3 วิธี ได้แก่ การล้างแบบเปียกด้วยน้ำและกรดอ่อน การแลกเปลี่ยนไอออน และการดูดซับด้วยแมกนีซอล พบว่าการล้างด้วยน้ำสามารถกำจัดเมทานอล สบู่และกลีเซอรอลได้ดี ปัจจัยที่มีต่อการกำจัดเมทานอล คือ อุณหภูมิและชนิดของน้ำล้าง ส่วนอัตราการเขย่าสารจะไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดเมทานอล แต่จะมีผลอย่างมากในการกำจัดสบู่เมื่อใช้น้ำกรดอ่อนเป็นน้ำล้าง นอกจากนี้ยังพบว่าการล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำสามารถดกกลีเซอรอลอย่างสมบูรณ์ภายใน 10 นาที ยกเว้นในกรณีที่ล้างด้วยน้ำกรดอ่อน โดยภาวะที่เหมาะสม คือ การล้างด้วยน้ำประปาที่อุณหภูมิห้อง ด้วยอัตราการกวน 200 รอบต่อ นาที และอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อไบโอดีเซลเป็น 0.5:1.0 ส่วนการล้างแบบแห้งด้วยการแลกเปลี่ยนไอออนจะมีประสิทธิภาพต่ำในการกำจัดเมทานอลเมื่อเวลาผ่านไปแล้ว 1 ชั่วโมง กระบวนการนี้สามารถลดปริมาณสบู่ได้ 10 เท่า และลดกลีเซอรอลอิสระได้ต่ำกว่ามาตรฐาน แต่ไม่มีประสิทธิภาพในการกำจัดกลีเซอรอล ไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการนี้จะมีค่าความเป็นกรดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย สำหรับกระบวนการดูดซับด้วยแมกนีซอลจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดเมทานอลสูงกว่าการใช้เรซิน แต่มีประสิทธิผลต่ำต่อการกำจัดสบู่และกลีเซอรอล อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพในการกำจัดสารปนเปื้อนจะดีขึ้นเมื่อใช้ตัวดูดซับที่ผ่านการอบแห้งมาแล้วและทำงานที่อุณหภูมิสูง

Predojevic และคณะ [18] ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารปนเปื้อนในไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันใช้แล้วโดยใช้ 3 กระบวนการ ได้แก่ การดูดซับด้วยซิลิกาเจล การล้างด้วยกรดฟอสฟอริกเข้มข้นร้อยละ 5 และการล้างด้วยน้ำกลั่นร้อน จากการทดลองพบว่าการดูดซับด้วยซิลิกาเจลและการล้างด้วยฟอสฟอริกจะมีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการกำจัดสารปนเปื้อนโดยสามารถกำจัดได้ถึงร้อยละ 92 ในขณะที่การล้างด้วยน้ำกลั่นสามารถกำจัดได้เพียงร้อยละ 89

Manique และ Faccini [19] ศึกษาการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์จากน้ำมันบริโภคใช้แล้ว ตัวดูดซับ คือซีเถ้าแกลบและแมกนีเซียมซิลิเกตเชิงพาณิชย์ โดยใช้ซีเถ้าแกลบที่มีความเข้มข้นร้อยละ 1-5 โดยมวล และแมกนีเซียมซิลิเกตร้อยละ 1 โดยมวล ภาวะการดูดซับให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส และกวนเป็นเวลา 20 นาที เมื่อนำตัวดูดซับทั้งสองชนิดไปดูดซับสารปนเปื้อนใน

ไบโอดีเซล พบว่าแมกนีเซียมซลิเกตที่ร้อยละ 1 มีประสิทธิภาพในการกำจัดกลีเซอรินและสารละลายกรดได้ดีกว่าซีเถ้าแคลบที่ทุกความเข้มข้น แต่จะไม่มีประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำ การดูดซับด้วยซีเถ้าแคลบและแมกนีเซียมซลิเกต ทุกภาวะสามารถกำจัดเมทานอลและโพแทสเซียมเกือบสมบูรณ์มีปริมาณน้อยกว่าร้อยละ 0.01 ของเมทานอลและ 0.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมของโพแทสเซียมที่ยังคงอยู่ในไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์แล้ว

Fadhil และ Mohammed [2] ศึกษาสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ผลิตไบโอดีเซล และเปรียบเทียบกับการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากกากชา ซิลิกาเจล และการล้างด้วยน้ำ จากผลการทดลองพบว่าการใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากกากชาในการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์จะให้ผลผลิตเมทิลเอสเทอร์ปริมาณมากกว่าเมื่อเทียบกับการใช้ซิลิกาเจลและการล้างด้วยน้ำ ส่วนค่าความหนืด ความหนาแน่น ค่ากรด และจุดวาบไฟของเมทิลเอสเทอร์บริสุทธิ์ที่ได้จากการใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากกากชาที่ใช้แล้วจะต่ำกว่าไบโอดีเซลที่ได้ การใช้ซิลิกาเจลและการล้างด้วยน้ำ

Berrios และคณะ [20] ศึกษาการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ โดยใช้ตัวดูดซับเป็นแมกนีเซียมซลิเกต และเบนโทไนด์ ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 0.5 0.75 และ 1.00 โดยน้ำหนัก ใช้เวลาในกระบวนการดูดซับ 15 นาทีความเร็วในการกวน 200 400 600 รอบต่อนาที พบว่าแมกนีเซียมซลิเกตและเบนโทไนด์สามารถกำจัดสารปนเปื้อนในไบโอดีเซล เช่น กลีเซอรอล เมทานอล น้ำ สบู กัดไขมันอิสระได้อย่างสมบูรณ์ เมื่อนำแมกนีเซียมซลิเกตและเบนโทไนด์ ที่มีความเข้มข้นเดียวกันคือที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก มาทดสอบการดูดซับสารปนเปื้อนในไบโอดีเซล พบว่ากระบวนการดูดซับด้วยแมกนีเซียมซลิเกตให้คุณภาพดีกว่าการดูดซับด้วยเบนโทไนด์

Debora และคณะ [21] ศึกษาการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ โดยการดูดซับแบบชั้นเดียวโดยใช้ซิลิกาเป็นตัวดูดซับแทนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีการล้างแบบเปียก ทำการทดลองภายใต้สภาวะอากาศ (0.2 บาร์) อุณหภูมิ 65-90 องศาเซลเซียส วิธีนี้ช่วยในการกำจัดเมทานอล น้ำ และสิ่งปนเปื้อนอื่นๆ ออกจากไบโอดีเซล เนื่องจากซิลิกาทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับที่ดีภายใต้ภาวะสภาวะอากาศ จึงเป็นการลดต้นทุนและเวลาในการผลิต จากการทดลองพบว่าซิลิกาใช้เป็นตัวดูดซับได้แต่ไม่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นตัวดูดซับสำหรับการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์แบบชั้นเดียว เนื่องจากกระบวนการดูดซับเกิดขึ้นหลายชั้น ดังนั้นซิลิกาจึงไม่เหมาะสมใช้เป็นตัวดูดซับแบบชั้นเดียว

Gomes และคณะ [22] ศึกษาการทำไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันดอกทานตะวันให้บริสุทธิ์ โดยใช้เซลลูโลสและแป้งเป็นตัวดูดซับและเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยการล้างแบบเปียกโดยน้ำร้อนและการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ โดยใช้ตัวดูดซับที่มีความเข้มข้นร้อยละ 1 2 5 และ 10 โดยน้ำหนัก เวลาในกระบวนการดูดซับ 10 นาทีที่อุณหภูมิห้อง พบว่าการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยกระบวนการล้างแบบเปียกมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารปนเปื้อนต่างๆ

ในไบโอดีเซลได้ดีกว่าการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ โดยวัดจากค่าความเป็นกรด โลหะหมู่ 1 และปริมาณกลีเซอรอลที่คงเหลืออยู่ในไบโอดีเซลร้อยละ 0.137 57.5 และ 0.13 ตามลำดับ

Claudiney และคณะ [23] ศึกษาผลความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความดันและอุณหภูมิต่อการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ โดยการฉีดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปผสมกับไบโอดีเซลที่ความเข้มข้นร้อยละ 20-50 โดยน้ำหนักภายใต้ความดันสูง (6-12 เมกะปาสคาล) ที่อุณหภูมิห้อง โดยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับไบโอดีเซล และมีการกำจัดสารปนเปื้อนต่างๆ ที่ไม่ทำปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา พบว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถใช้ในการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ได้ ภาวะที่ดีที่สุด คือ การฉีดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดัน 6.02 เมกะปาสคาล อุณหภูมิ 297 เคลวิน ส่งผลให้ปริมาณกลีเซอรอลและเมทานอลปนเปื้อนอยู่ในไบโอดีเซลร้อยละ 0.013 และ 0.013 ตามลำดับ และทำให้มีค่าเมทิลเอสเทอร์ในไบโอดีเซลสูงถึงร้อยละ 99.17

Ahamd และคณะ [24] ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุดสำหรับการกำจัดสีย้อม (RBBR) ออกจากน้ำ การเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุดดำเนินการโดยนำถ่านกัมมันต์ผ่านการกระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพร่วมกับทางเคมีโดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับแก๊สซิฟิเคชันร่วมกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ตัวแปรที่ศึกษา คือ อุณหภูมิ เวลา และอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ที่ใช้ในการกระตุ้นต่อร้อยละการลดลงของปริมาณ RBBR และร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์ ภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุด คือ ที่อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์ 3:1 อุณหภูมิในการกระตุ้น 828 องศาเซลเซียส เวลาในการดูดซับ 60 นาที ส่งผลให้ร้อยละการลดลงของปริมาณ RBBR และมีร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์เป็น ร้อยละ 80.35 และร้อยละ 20.76 ตามลำดับ

Michelle และคณะ [22] ศึกษาผลของการทำให้ไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันดอกทานตะวันแห้งให้บริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วยตัวดูดซับทางธรรมชาติ เช่น เซลลูโลสและแป้งจากข้าวโพดมันฝรั่งมันสำปะหลังและข้าว) เปรียบเทียบกับการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์และการล้างแบบเปียกด้วยน้ำร้อน การทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์โดยการล้างแบบแห้งดำเนินการโดยใช้ตัวดูดซับร้อยละ 1%, 2%, 5% และ 10% โดยมวลต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที สำหรับการทำให้ไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์โดยการล้างแบบเปียกดำเนินการโดยล้างด้วยน้ำและกรดบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียสจนกระทั่งถ่านกัมมันต์มีค่าเป็นกลาง โดยศึกษาการกำจัดสิ่งสกปรกในไบโอดีเซล เช่น ค่าความเป็นกรด กลีเซอรินและค่าความขุ่น จากผลการทดลองพบว่าตัวดูดซับทั้งหมดมีประสิทธิภาพในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนในไบโอดีเซลที่คล้ายกัน แสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับทางทางธรรมชาติสามารถใช้เป็นตัวดูดซับสารปนเปื้อนในไบโอดีเซลได้

Williams และคณะ [25] ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากของเสียชีวมวลซึ่งเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมสิ่งทอผ่านกระบวนการกระตุ้นทางกายภาพและทางเคมี การกระตุ้นทางกายภาพ

ดำเนินการโดยเผาในที่อับอากาศภายใต้แก๊สไนโตรเจน ส่วนการกระตุ้นทางเคมีดำเนินการโดยที่อัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์เป็น 0.2:1 1:1 และ 2:1 ที่อุณหภูมิการกระตุ้น 450 550 650 และ 800 องศาเซลเซียส ผลการทดลองสำหรับการกระตุ้นทางกายภาพสามารถเพิ่มพื้นที่ผิวได้สูงถึง 840 ตารางเมตรต่อกรัมส่งผลให้ปริมาตรรูพรุนแบบเมโซพอร์เพิ่มขึ้นด้วย ส่วนการกระตุ้นทางเคมีโดยใช้ซิงค์คลอไรด์เป็นสารกระตุ้น พบว่า มีการกระจายตัวของรูพรุนแบบไมโครพอร์เป็นส่วนใหญ่ ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวสูงสุด 2400 ตารางเมตรต่อกรัม ที่อัตราส่วนระหว่างซิงค์คลอไรด์และถ่านชาร์เป็น 0.2:1 ที่อุณหภูมิการกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส



บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาปัจจัยและภาวะที่เหมาะสมในการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยกระบวนการทางกายภาพโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกมังคุด เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์มากกว่าร้อยละ 96.5 โดยในการทดลองได้ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์และภาวะที่เหมาะสมในการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้รวมถึงขั้นตอนการทดลอง แสดงได้ดังนี้

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 การไฟโรไลซิสเปลือกมังคุดและการคาร์บอนไนซ์ถ่านชาร์

1. เตาเผาให้ความร้อนแบบท่อ (Tubular furnace) ยี่ห้อ Vecstar Furnances รุ่น VCTF7
2. เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed bed reactor) ทำจากสแตนเลส
3. เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ชนิด K
4. อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน (Rotameter) ยี่ห้อ Newflow รุ่น FBC-V-P-A-500C
5. ตัวควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller) ยี่ห้อ TAIE รุ่น PFY400

3.1.2 การกระตุ้นถ่านชาร์และการเพิ่มความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซล

1. เครื่องเขย่าแนวราบ (Orbital shaker) ยี่ห้อ CTL รุ่น SK3
2. ตู้อบ (Oven) ยี่ห้อ Binder รุ่น ED115
3. ตะแกรงร่อน เบอร์ 60 (0.25 มิลลิเมตร)
4. โถดูดความชื้น (Desiccator)
5. เครื่องทำสุญญากาศ (Vacuum pump) ยี่ห้อ Sibata รุ่น WJ-20
6. กรวยกรองแบบสุญญากาศ (Buchner funnel) 43
7. ขวดกรอง (Suction flask)
8. ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 125 และ 250 มิลลิลิตร
9. ขวดปรับปริมาตร (Volumetric flask) ขนาด 25 100 250 500 และ 1,000 มิลลิลิตร
10. กรวยแยกสาร (Separatory funnel) ขนาด 1,000 มิลลิลิตร
11. กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 และ เบอร์ 42
12. กระดาษลิตมัส ยี่ห้อ MACHEREY-NAGEL pH-Fix 0-14

13. โรงอบตสาร

3.1.3 การวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์และไบโอดีเซล

1. เครื่องวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวด้วยวิธี Bruner-Emmet-Teller (BET) ยี่ห้อ Quanta-Chrome Corporation รุ่น Autosorb-1
2. เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography-Mass Spectrometry, GC-MS) ยี่ห้อ Agilent Technologies รุ่น 7890A
3. เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography, GC) ยี่ห้อ varian รุ่น CP3800

3.2 วัตถุดิบ

3.2.1 เปลือกมังคุดที่ได้จากการบริโภคตามบ้านเรือน

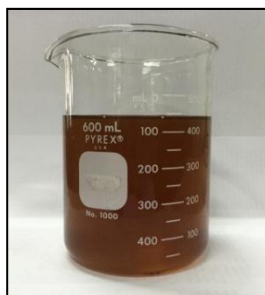
เปลือกมังคุดที่ได้จากการบริโภคตามบ้านเรือน แสดงดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 (ก) เปลือกมังคุดสด และ (ข) เปลือกมังคุดที่ผ่านการทำความสะอาดและอบแห้งแล้ว

3.2.2 ไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท บางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) ซึ่งผลิตได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้น้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ที่ผ่านการใช้งานแล้วเป็นสารตั้งต้น มีลักษณะเป็นสีน้ำตาลอ่อน แสดงดัง



ภาพที่ 3.2 ไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้น้ำมันพืชหรือสัตว์ที่ผ่านการใช้งานแล้วเป็นสารตั้งต้น

3.3 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

1. แก๊สไนโตรเจน (N_2 , 99.99%, Praxair)
2. โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH, AR grade, Ajax Finechem)
3. เมทิลเฮกซะเดคะโนเอต ($CH_3(CH_2)_{15}COOCH_3$, 99%)
4. ไอโซโพรพานอล (Isopropanol, AR grade, Q Rec)
5. กรดไฮโดรคลอริก (HCl, 37%, Carlo Erba)
6. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH, AR grade, Carlo Erba)
7. โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3 , AR grade, Loba Chemie)
8. โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ($NaHCO_3$, AR grade, Loba Chemie)
9. กรดซัลฟูริก (H_2SO_4 , 96%, Mallinckrodt Chemical)
10. โซเดียมไทโอซัลเฟต ($(Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O)$, AR grade, Ajax Finechem)
11. ไอโอดีน (I_2 , AR grade, Ajax Finechem)
12. โพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI, AR grade, Ajax Finechem)
13. โพแทสเซียมไอโอเดต (KIO_3 , AR grade, Ajax Finechem)
14. เฮปเทน (C_7H_{16} , AR grade, Qrec)
15. น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)
16. โบรโมฟีนอลบลู (Bromophenol blue)
17. ฟีนอล์ฟทาลีน (Phynolphthalein)
18. เมทิลออเรนจ์ (Methyl orange)
19. ถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ จากบริษัท Panreac Quimica UK

3.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

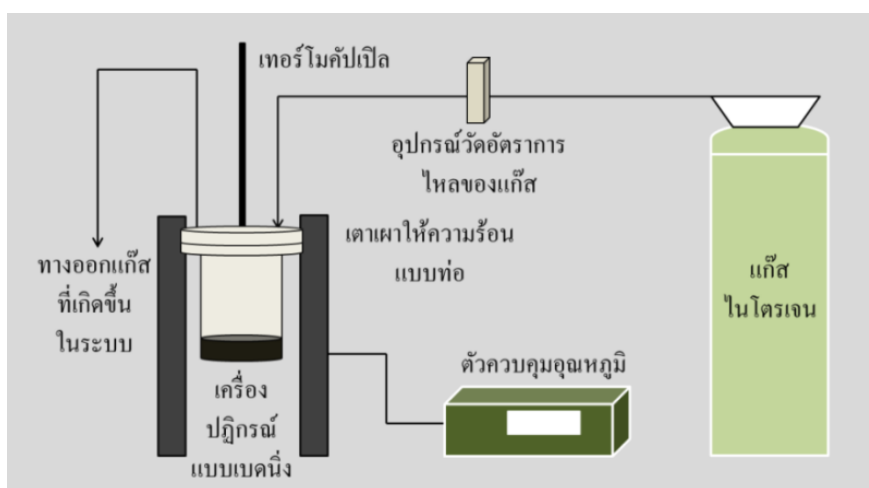
3.4.1 การเตรียมตัวอย่างเปลือกมังคุด

วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ คือ เปลือกมังคุดสดจากการบริโภค ซึ่งถูกปนเปื้อนด้วยสิ่งสกปรกและยาฆ่าแมลง (ภาพที่ 3.1(ก)) นำมาล้างทำความสะอาดเพื่อเอาสิ่งสกปรกดังกล่าวออกและอบให้แห้งเพื่อไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำเปลือกมังคุดที่อบแห้งแล้วมาบดให้ละเอียดให้มีขนาด 1 ถึง 2 มิลลิเมตร และร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 18

3.4.2 การไพโรไลซิส

1. ชั่งน้ำหนักเปลือกมังคุดที่ผ่านการทำความสะอาดและอบแห้งแล้วประมาณ 50 กรัม ใส่ลงในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (ภาพที่ 3.4)

2. เพิ่มอุณหภูมิจาก 105 องศาเซลเซียส ไปที่ 500 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่ออนาที ให้ความร้อนต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ภายใต้ภาวะแก๊สไนโตรเจนที่อัตราการไหล 50 มิลลิลิตร หลังจากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เย็น
3. นำถ่านชาร์ออกจากเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง บดให้มีขนาดเล็กกว่า 0.25 มิลลิลิตร และร้อนด้วยตะแกรงเบอร์ 60
4. อบถ่านชาร์ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และเก็บในโถดูดความชื้น เพื่อรอการกระตุ้น



ภาพที่ 3.3 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งสำหรับการไพโรไลซิสเปลือกมังคุดและการคาร์บอไนซ์ถ่านชาร์

5. วิเคราะห์องค์ประกอบของถ่านชาร์แบบประมาณ (Proximate analysis, ASTM D3172-3175) เพื่อหาปริมาณความชื้น สารระเหย เถ้า และคาร์บอนคงตัว (ภาคผนวก ก)

3.4.3 การกระตุ้นถ่านชาร์

การกระตุ้นเป็นวิธีการเพิ่มรูพรุน หมู่ฟังก์ชัน หรือพื้นที่ผิวให้กับถ่านชาร์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกระตุ้นเรียกว่า ถ่านกัมมันต์ งานวิจัยนี้ทำการกระตุ้นถ่านชาร์ด้วยวิธีทางเคมีโดยใช้สารเคมี คือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ วิธีดำเนินงานมีดังนี้

1. บรรจุถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิส ประมาณ 10 กรัม ลงในปิกรเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. เตรียมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์โดยชั่งโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์น้ำหนัก 5 กรัม (คิดเป็นอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์เท่ากับ 0.5:1) ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนแล้วปรับให้มีปริมาตร 50 มิลลิลิตร ด้วยขวดปรับปริมาตร

3. เติมน้ำละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ที่มีถ่านชาร์ อยู่และนำไปปั่นกวนด้วยเครื่องปั่นกวนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
4. นำถ่านชาร์ที่ผ่านการกระตุ้นมาทำให้แห้งด้วยเครื่องให้ความร้อน hot plate จนถ่านชาร์ แห้ง
5. นำถ่านชาร์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารเคมีไปให้ความร้อนในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งให้ ความร้อนภายใต้ภาวะแก๊สไนโตรเจนที่อัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการให้ ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และให้ความ ความร้อนต่อเนื่องที่อุณหภูมิดังกล่าว เป็นเวลา 60 นาทีและทิ้งไว้ให้เย็น
6. นำตัวอย่างล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ล้างด้วยน้ำร้อนปราศจากไอออน 2 ครั้ง และล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนจนมี ค่าความเป็นกรด-เบสเป็นกลาง
7. นำตัวอย่างไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้ถ่านกัมมันต์ที่ กระตุ้นด้วยวิธีทางเคมี
8. นำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มาวิเคราะห์องค์ประกอบของถ่านกัมมันต์แบบประมาณ (ภาคผนวก ก) วิเคราะห์หาปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ (ภาคผนวก ข) และวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวด้วยวิธี BET
9. ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อ ถ่านชาร์เป็น 0.75 1.00 1.25 และ 1.50 และเปลี่ยนอุณหภูมิในการกระตุ้นเป็น 600 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

3.4.4 การทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกมังคุดโดย กำหนดภาวะในการดูดซับคงที่

1. นำไบโอดีเซลที่ได้จากโรงงานมาเติมถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัม มันต์และไบโอดีเซลเท่ากับ 7 กรัมต่อลิตร ในขวดรูปชมพู่
2. นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง และความดันบรรยากาศเป็น เวลา 60 นาที
3. เมื่อครบกำหนดเวลาแล้ว นำไบโอดีเซลที่ผ่านการดูดซับมากรองเพื่อแยกตัวดูดซับออก จากไบโอดีเซล
4. นำไบโอดีเซลที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์มาวิเคราะห์ปริมาณกลีเซอรอล ปริมาณกรด ไชมันอิสระ ปริมาณสบู่ และปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (ภาคผนวก ค)

5. ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และไบโอดีเซลเป็น 3 5 9 และ 11 กรัมต่อลิตร และเวลาในการดูดซับเป็น 60 90 120 และ 180 นาที โดยกำหนดให้ความเร็วรอบในการเขย่าคงที่ที่ 250 รอบต่อนาที
6. เลือกภาวะการดูดซับที่ดีที่สุดจากข้อ 5 มาทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนความเร็วรอบในการเขย่าเป็น 150 200 250 และ 300 รอบต่อนาที

3.4.5 การฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการใช้งานแล้ว

1. นำถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการใช้งานแล้วไปแช่ในเฮกเซน (Hexane) ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรระหว่างเฮกเซนและถ่านกัมมันต์เท่ากับ 3 ต่อ 1
2. นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้น กรองแยกถ่านกัมมันต์ด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1
3. อบถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
4. นำถ่านกัมมันต์ที่ได้ไปให้ความร้อนในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง ให้ความร้อนภายใต้ภาวะแก๊สไนโตรเจนที่อัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และให้ความร้อนต่อเนื้อที่อุณหภูมิดังกล่าว เป็นเวลา 60 นาทีและทิ้งไว้ให้เย็น จะได้ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพ
5. ดูดซับไบโอดีเซลด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพ ที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และไบโอดีเซลเท่ากับ 9 กรัมต่อลิตรที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที และเวลาในการดูดซับ 120 นาที
6. นำไบโอดีเซลที่ผ่านการดูดซับมากกรองเพื่อแยกตัวดูดซับออกจากไบโอดีเซล
7. นำไบโอดีเซลที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพมาวิเคราะห์สัดส่วนสบู่และเมทิลเอสเทอร์ในไบโอดีเซล (ภาคผนวก ค)

บทที่ 4

การทดลองและอภิปรายผลการทดลองผล

งานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุดที่ผ่านการกระตุ้นทางเคมีด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ตัวแปรที่ศึกษาคือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านซาร์ และอุณหภูมิการกระตุ้น ส่วนที่สองศึกษาการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ ตัวแปรที่ศึกษาคือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างถ่านกัมมันต์และไบโอดีเซล เวลาในการดูดซับ และความเร็วรอบในการเขย่า เพื่อเปรียบเทียบสมบัติและประสิทธิภาพการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์กับวิธีการล้างแบบเปียกและการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ นอกจากนี้ยังศึกษาการฟื้นฟูสภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการใช้งานแล้ว ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

4.1 สมบัติของวัตถุดิบ

วัตถุดิบหลักที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 2 ชนิดด้วยกันคือ ไบโอดีเซลที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ผ่านการใช้งานแล้ว และเปลือกมังคุดที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการเตรียมถ่านกัมมันต์ เนื่องจากเปลือกมังคุดเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบอยู่มาก เพื่อเป็นการกำจัดและลดปริมาณของเสียซึ่งเป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรอีกด้วย

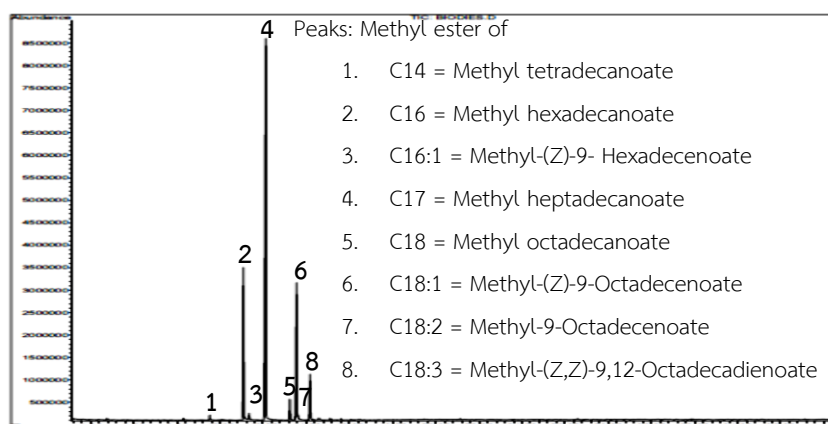
4.1.1 สมบัติของไบโอดีเซล

ภาพที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบของไบโอดีเซลที่ใช้ในการทดสอบซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท บางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) พบว่ามีองค์ประกอบหลักเป็นสารประกอบเอสเทอร์ที่มีคาร์บอนตั้งแต่ C14 ถึง C18 และมีสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความหนาแน่น จุดวาบไฟ ความหนืด และเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชัน (ตารางที่ 4.1) อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน แต่มีการปนเปื้อนของกลีเซอรอล น้ำและกรดไขมันอิสระสูงกว่ามาตรฐาน 1.65 7.06 และ 1.285 เท่าตามลำดับ ส่งผลให้มีปริมาณเมทิลเอสเทอร์ต่ำกว่ามาตรฐานประมาณ 0.907 เท่า

4.1.2 สมบัติของเปลือกมังคุดและถ่านซาร์

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate analysis) ของผงเปลือกมังคุดและถ่านซาร์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์ (Carbonization) พบว่าผงเปลือกมังคุดจะมีปริมาณสารระเหย

ได้ (Volatile matter) และถ้าเป็นองค์ประกอบหลัก ส่วนคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) และความชื้น (Moisture) จะมีปริมาณต่ำ เมื่อนำเปลือกมังคุดไปผ่านการคาร์บอนไนซ์ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส จะทำให้ความชื้นและสารระเหยได้ในเปลือกมังคุดเกิดการสลายตัว ถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์จึงมีความชื้นและปริมาณสารระเหยได้ลดลง ส่งผลให้มีปริมาณเถ้าและคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น กล่าวคือความชื้นและปริมาณสารระเหยได้จะลดลง 1.42 และ 1.65 เท่า ในขณะที่ปริมาณเถ้าและคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น 5.00 และ 2.96 เท่าตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับผงเปลือกมังคุด



ภาพที่ 4.1 องค์ประกอบในไบโอดีเซลจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่ใช้น้ำมันบริโภคที่ผ่านการใช้งานแล้วเป็นสารตั้งต้น

ตารางที่ 4.1 สมบัติเบื้องต้นของไบโอดีเซลก่อนทำให้บริสุทธิ์ด้วยกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากเปลือกมังคุด

สมบัติของไบโอดีเซล	EN 14214	ไบโอดีเซล
เมทิลเอสเทอร์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	> 96.5	87.50 ± 0.021
กลีเซอรอล (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	< 0.02	0.033 ± 0.006
สบู่ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	NA	4.59 ± 0.32
กรดไขมันอิสระ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	< 0.2	0.257 ± 0.005
น้ำ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	< 0.05	0.353
ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	0.86 - 0.90	0.87 ± 0.0014
จุดวาบไฟ (องศาเซลเซียส)	> 120	188 ± 0.002
ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (เซนติสโตกส์)	3.5-5	4.11 ± 0.0035

สมบัติของไบโอดีเซล	EN 14214	ไบโอดีเซล
ค่าความเป็นกรด (มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม)	<0.5	0.511 ± 0.01
เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส (ชั่วโมง)	> 6	1.9

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณของเปลือกมังคุดและถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์

วัตถุดิบ	องค์ประกอบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	ความชื้น	เถ้า	สารระเหยได้	คาร์บอนคงตัว
ผงเปลือกมังคุด	3.97 ± 0.00	0.07 ± 0.00	79.56 ± 0.01	16.40 ± 0.01
ถ่านชาร์	2.79 ± 0.03	0.35 ± 0.00	48.25 ± 0.00	48.61 ± 0.04

4.2 ภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุด

การกระตุ้นด้วยสารเคมีเป็นการเพิ่มรูพรุน พื้นที่ผิว และหมู่ฟังก์ชันให้ถ่านชาร์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกระตุ้นเรียกว่าถ่านกัมมันต์ งานวิจัยนี้ศึกษาการกระตุ้นถ่านชาร์ด้วยวิธีทางเคมีโดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้น ซึ่งให้ผลการวิจัยดังนี้

4.2.1 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์

การศึกษาผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ต่อการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์โดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้น จะดำเนินการโดยใช้อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์ในช่วง 0.5-1.5 อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และดูดซับสารปนเปื้อนในไบโอดีเซลที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และไบโอดีเซลเท่ากับ 7 กรัมต่อลิตร เวลาในการดูดซับ 60 นาทีและอัตราการเขย่า 250 รอบต่อนาที ตารางที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์ในช่วง 0.5-1.5 พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์จะทำให้ปริมาณความชื้น เถ้าและสารระเหยได้ลดลงเล็กน้อย ส่งผลให้ถ่านกัมมันต์มีสัดส่วนของคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากการกระตุ้นถ่านชาร์ด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นสารชนิดเบส สามารถระเหยได้อย่าง

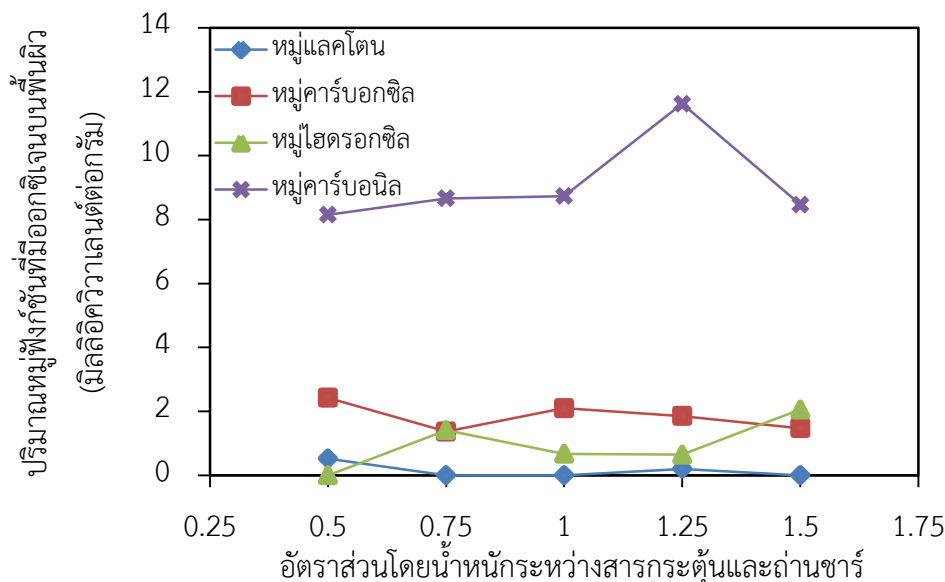
รวดเร็ว เมื่อทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิสูง [26] ส่งผลให้อินทรีย์วัตถุหรืออนินทรีย์วัตถุต่างๆ ที่อยู่ในโครงสร้างของถ่านชาร์หลุดออกหรือสลายตัวไป [27] ส่งผลให้ถ่านกัมมันต์มีรูพรุนมากขึ้น

ตารางที่ 4.3 ผลของอัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ต่อองค์ประกอบโดยประมาณของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกมังคุดโดยการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

อัตราส่วนสาร กระตุ้นและ ถ่านชาร์	องค์ประกอบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	ความชื้น	เถ้า	สารระเหยได้	คาร์บอนคงตัว
0.50 : 1	1.25 ± 0.03	0.05 ± 0.04	10.04 ± 0.08	88.66 ± 0.10
0.75 : 1	1.14 ± 0.05	0.05 ± 0.04	10.08 ± 0.30	88.73 ± 0.06
1.00 : 1	1.18 ± 0.04	0.02 ± 0.05	10.02 ± 0.15	88.78 ± 0.11
1.25 : 1	1.14 ± 0.03	0.01 ± 0.05	9.98 ± 0.06	88.87 ± 0.07
1.50 : 1	1.13 ± 0.03	0.01 ± 0.03	9.82 ± 0.03	89.04 ± 0.04

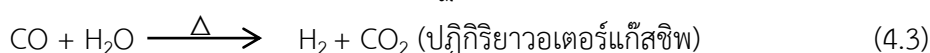
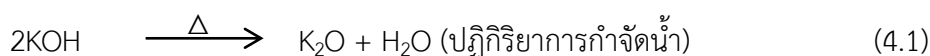
ภาพที่ 4.2 แสดงหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์ในช่วง 0.5 - 1.5 พบว่าถ่านกัมมันต์มีปริมาณหมู่คาร์บอนิลและหมู่ไฮดรอกซิลเพิ่มขึ้นจาก 8.15 เป็น 11.62 มิลลิอิกวิวาเลนต์ต่อกรัม และ 0 เป็น 2.06 มิลลิอิกวิวาเลนต์ต่อกรัม เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์จาก 0.5 ถึง 1.25 ส่วนปริมาณหมู่คาร์บอกซิลจะลดลงเล็กน้อยจาก 0.52 เป็น 0 มิลลิอิกวิวาเลนต์ต่อกรัม และมีหมู่แลคโตนน้อยมากจนเกือบเป็นศูนย์ เนื่องจากหมู่แลคโตนสามารถรวมตัวอยู่ในคาร์บอกซิล [28] จึงไม่ปรากฏหมู่ฟังก์ชันของแลคโตนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ การที่พื้นผิวของถ่านกัมมันต์มีปริมาณหมู่เบส (หมู่คาร์บอนิล) มากกว่าหมู่กรด (หมู่คาร์บอกซิล หมู่ไฮดรอกซิลและหมู่แลคโตน) เนื่องจากการใช้สารกระตุ้นเป็นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งมีสมบัติเป็นเบส จึงทำให้เป็นการเพิ่มปริมาณหมู่แอลคาไลน์ (Alkaline group) หรือปริมาณหมู่เบสชนิดไพโรนและอนุพันธ์ของคีโตนชนิดไพโรนและโครมี [12] ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของหมู่คาร์บอนิลและสารกระตุ้นดังกล่าวอาจจะไปลดปริมาณหมู่กรดหรือไม่เพิ่มปริมาณหมู่กรดบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ อย่างไรก็ตามการเพิ่มอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์จาก 1.25 เป็น 1.5 จะทำให้ปริมาณหมู่คาร์บอนิลลดลง เนื่องจากโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะเข้าไป

ทำปฏิกิริยากับคาร์บอนในรูปฟุนมากเกินพอ [29] ทำให้รูปฟุนมีโอกาสที่เกิดรวมตัวกันเป็นรูปฟุนขนาดใหญ่ซึ่งอาจทำให้พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ลดลง

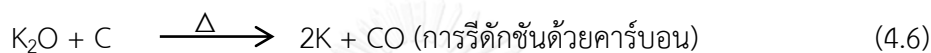
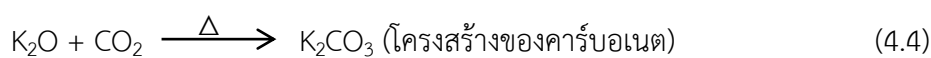


ภาพที่ 4.2 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ต่อปริมาณขี้เถ้าฟุ้งกึ่งชั้นที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เวลาดูดซับสาร 24 ชั่วโมง กระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

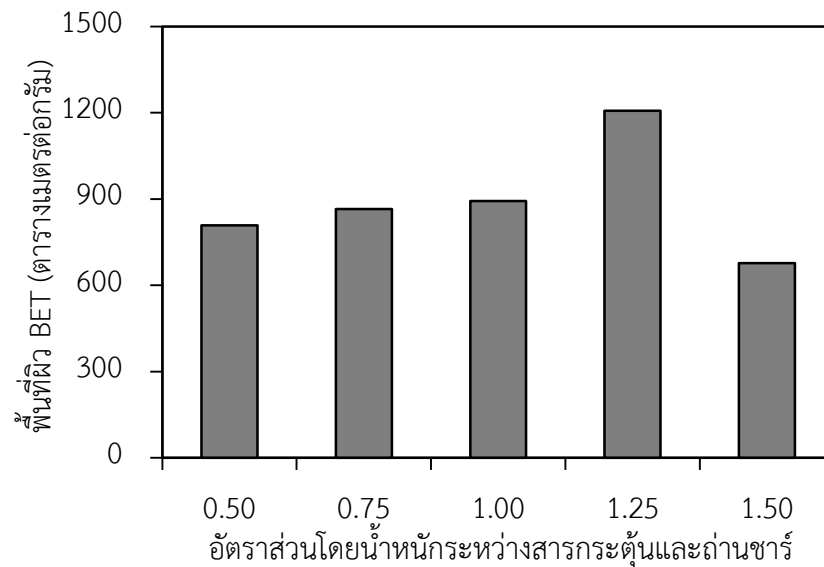
ภาพที่ 4.3-4.4 แสดงผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ต่อพื้นที่ผิว BET ปริมาตรรูฟุนและขนาดรูฟุน พบว่าพื้นที่ผิว BET ปริมาตรรูฟุนและขนาดรูฟุนมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น เมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์เพิ่มขึ้นจาก 0.5 เป็น 1.25 เนื่องจากการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะเกิดปฏิกิริยาหลายปฏิกิริยาต่อเนื่องกัน กล่าวคือ เมื่อกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณที่เหมาะสม โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์จะสลายตัวเป็นโพแทสเซียมออกไซด์และน้ำ ดังสมการ (4.1) น้ำที่ได้จะทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับอะตอมคาร์บอน (ปฏิกิริยาแก๊ส-น้ำ) ดังสมการ (4.2) โดยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นทำปฏิกิริยากับน้ำ (ปฏิกิริยาออเตอร์แก๊สซิฟ) ดังสมการ (4.3) ได้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจน และระเหยออกจากโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ [11] ทำให้ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิว BET และปริมาตรรูฟุนรวมเพิ่มมากขึ้น [30]



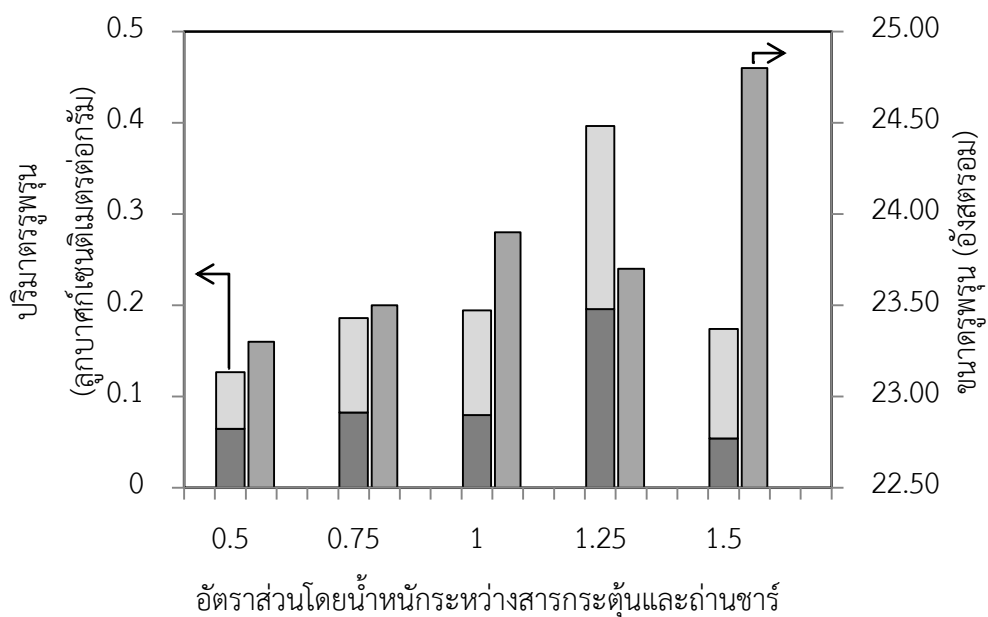
อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์จาก 1.25 เป็น 1.50 พื้นที่ผิว BET ปริมาตรรูพรุนและขนาดรูพรุนมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากโมเลกุลของโพแทสเซียมออกไซด์ที่เกิดจากการสลายตัวของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มากเกินไปจะทำปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สไฮโดรเจน และอะตอมของคาร์บอน ดังสมการ (4.4)-(4.6) เกิดเป็นโมเลกุลของโพแทสเซียมคาร์บอเนตและอะตอมของโลหะโพแทสเซียม ซึ่งสารทั้ง 2 ชนิดสามารถแทรกเข้าไปในชั้นของอะตอมคาร์บอน ทำให้โครงสร้างรูพรุนระหว่างชั้นของอะตอมคาร์บอนมีความกว้างที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้พื้นที่ผิว BET และปริมาตรรูพรุนมีแนวโน้มที่ลดต่ำลง [31]



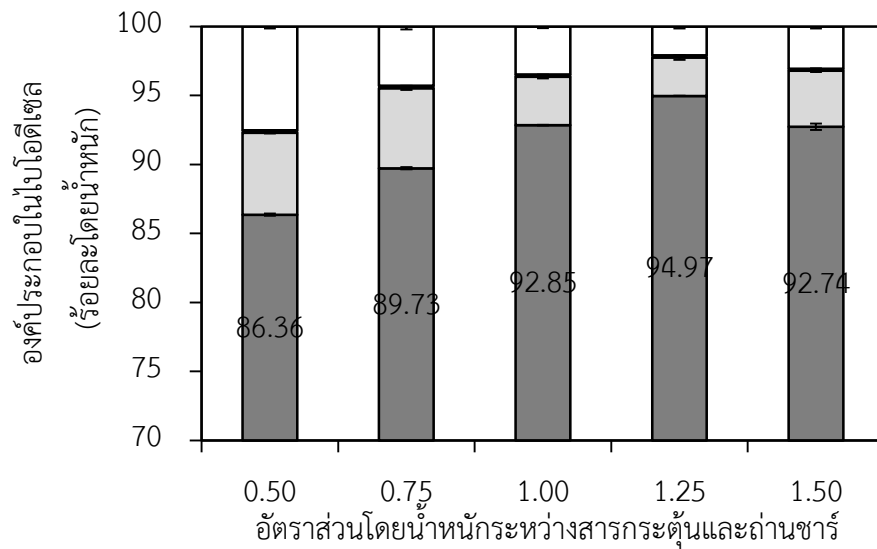
ภาพที่ 4.5 แสดงผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านกัมมันต์ในช่วง 0.5-1.5 ต่อการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ พบว่าไบโอดีเซลที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์ในช่วง 0.5 - 1.25 มีสัดส่วนเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 86.36 เป็นร้อยละ 96.14 เนื่องจากการเพิ่มอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์มากขึ้น ส่งผลต่อปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนผิวถ่านกัมมันต์โดยเฉพาะหมู่คาร์บอนิลจะมีมากขึ้น ซึ่งหมู่ดังกล่าวเป็นหมู่เบสและมีสภาพผิวเป็นประจุบวก [14] จึงสามารถดูดซับสารปนเปื้อนอื่นๆ ที่มีสมบัติทางประจุเป็นลบได้ เช่น กรดไขมันอิสระและกลีเซอรอลให้ลดลงจากร้อยละ 0.17 เป็นร้อยละ 0.15 และจากร้อยละ 0.005 เป็นร้อยละ 0.002 (ภาพที่ 4.6) ในขณะที่หมู่คาร์บอกซิลและหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งเป็นหมู่กรดและมีสภาพผิวเป็นประจุลบจึงสามารถดูดซับสารที่มีสมบัติทางประจุเป็นบวก เช่น สบูซึ่งเป็นเกลือของกรดไขมัน (เนื่องจากใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา) ดังภาพที่ 4.5 ทำให้สัดส่วนสบู่และสารปนเปื้อนอื่นๆ ในไบโอดีเซลลดลงส่งผลให้ไบโอดีเซลมีความบริสุทธิ์มากขึ้น สังเกตได้จากการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนเมทิลเอสเทอร์ แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์จาก 1.25 เป็น 1.5 จะทำให้สัดส่วนสารปนเปื้อนและสบู่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สัดส่วนเมทิลเอสเทอร์ในไบโอดีเซลลดลง เนื่องจากปริมาณหมู่คาร์บอนิลบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ลดลง



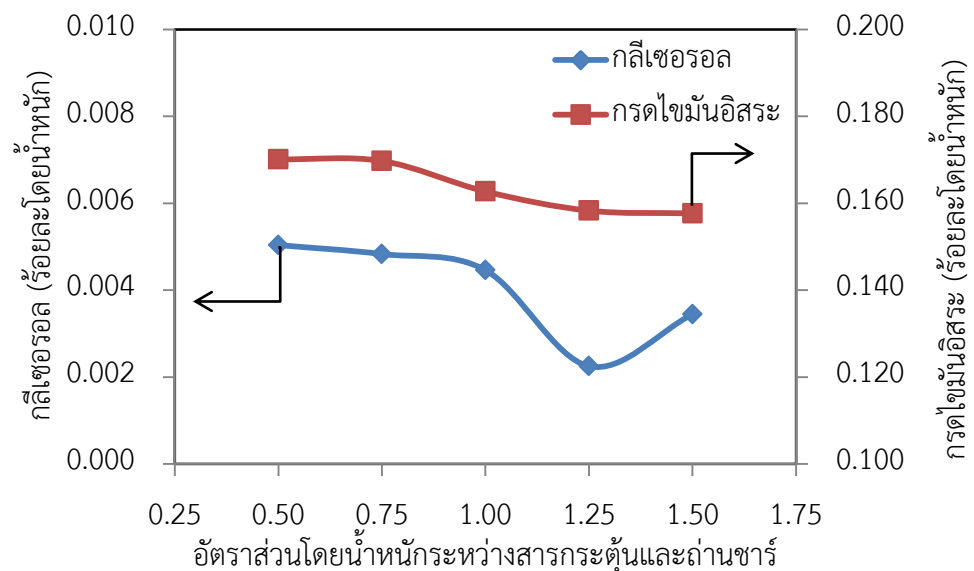
ภาพที่ 4.3 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านกัมมันต์ต่อพื้นที่ผิว BET ของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิการกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส เวลาดูดซับสารกระตุ้น 24 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.4 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านกัมมันต์ต่อ (■) ปริมาณรุกรุ่นแบบไมโครพอร์ (■) ปริมาณรุกรุ่นแบบเมโซพอร์ และ (■) ขนาดรุกรุ่นของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิการกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส เวลาดูดซับสารกระตุ้น 24 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.5 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ต่อองค์ประกอบในโพลีเอทิลีนไกล์ โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิการกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส ดูดซับสารปนเปื้อนในโพลีเอทิลีนไกล์ที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และโพลีเอทิลีนไกล์เท่ากับ 7 กรัมต่อลิตรต่อลิตรอัตราการใช้ 250 รอบต่อนาที เวลาในการดูดซับ 60 นาที : (■) เมทิลเอสเทอร์ (■) สบู่ และ (□) สารปนเปื้อน



ภาพที่ 4.6 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ต่อปริมาณกลีเซอรอลและกรดไขมันอิสระในโพลีเอทิลีนไกล์ โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ กระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

4.2.2 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นถ่านกัมมันต์

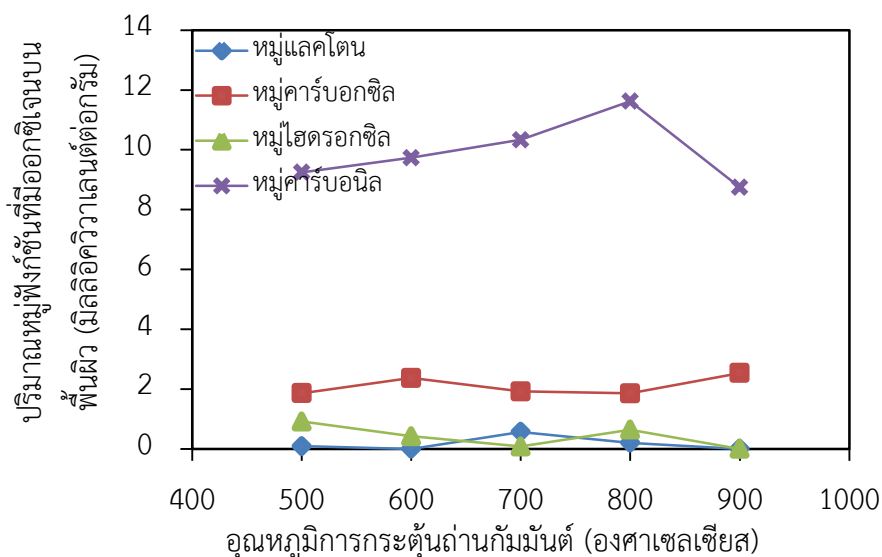
การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกมังคุดที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ ดำเนินการในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งภายใต้ภาวะแก๊สไนโตรเจนที่อัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที ตารางที่ 4.4 แสดงผลการวิเคราะห์โดยประมาณของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกมังคุดที่กระตุ้นด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 500-900 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ 1.25 พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิในช่วง 500-900 องศาเซลเซียสทำให้ปริมาณความชื้นและสารระเหยได้มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากถ่านกัมมันต์ที่เตรียมด้วยการกระตุ้นด้วยความร้อนในบรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 500-900 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดการสลายตัวของโครงสร้างที่มีพันธะไม่แข็งแรงและหลุดออกไปในรูปของสารระเหยได้ [24] ทำให้กลุ่มโมเลกุลวงแหวนแตกออกจากกันเป็นกลุ่มๆ จำนวนมาก โครงสร้างวงแอโรแมติกหลักที่เหลือจะกลายเป็นโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ [5, 32] ทำให้ถ่านกัมมันต์มีส่วนของคาร์บอนคงตัวที่เพิ่มมากขึ้นจากร้อยละ 87.89 เป็นร้อยละ 88.92

ตารางที่ 4.4 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นต่อองค์ประกอบโดยประมาณของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกมังคุดโดยการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

อุณหภูมิในการกระตุ้น (องศาเซลเซียส)	องค์ประกอบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	ความชื้น	สารระเหย	เถ้า	คาร์บอนคงตัว
500	1.32 ± 0.06	10.96 ± 0.17	0.03 ± 0.01	87.69 ± 0.01
600	1.27 ± 0.04	10.63 ± 0.03	0.08 ± 0.04	88.02 ± 0.04
700	1.14 ± 0.09	10.70 ± 0.15	0.09 ± 0.05	88.08 ± 0.15
800	1.14 ± 0.08	9.98 ± 0.06	0.04 ± 0.01	88.84 ± 0.10
900	1.13 ± 0.08	9.86 ± 0.05	0.09 ± 0.01	88.92 ± 0.02

ภาพที่ 4.7 แสดงปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 500-900 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ 1.25 พบว่าการเตรียมถ่านกัมมันต์ด้วยการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 500-900 องศาเซลเซียส ให้หมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนที่เป็นหมู่เบสหรือหมู่คาร์บอนิลมากกว่าหมู่กรดหรือหมู่คาร์บอกซิล หมู่ไฮดรอกซิล และหมู่แลคโตน เนื่องจากการกระตุ้นโดยใช้ความร้อนจะทำให้เกิดการออกซิเดชันของลิวิสออกซิเจน (Lewis oxygen) ที่อยู่ในระนาบชั้นแกรฟีนที่เป็นหมู่เบสมากกว่าหมู่กรด การเพิ่มอุณหภูมิในช่วง 500-800 องศาเซลเซียส ทำให้ปริมาณหมู่คาร์บอนิลเพิ่มจาก 9.25 เป็น 11.62

มิลลิอิกิวาเลนต์ต่อกรัม และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 800 เป็น 900 องศาเซลเซียส พบว่าหมู่คาร์บอนิล หมู่ไฮดรอกซิล และหมู่แลคโตนมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากหมู่คาร์บอนิลจะเกิดการสลายตัวเป็นแก๊ส คาร์บอนมอนอกไซด์ที่อุณหภูมิมากกว่า 850 องศาเซลเซียส หมู่ไฮดรอกซิลสลายตัวที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส และหมู่แลคโตนเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส

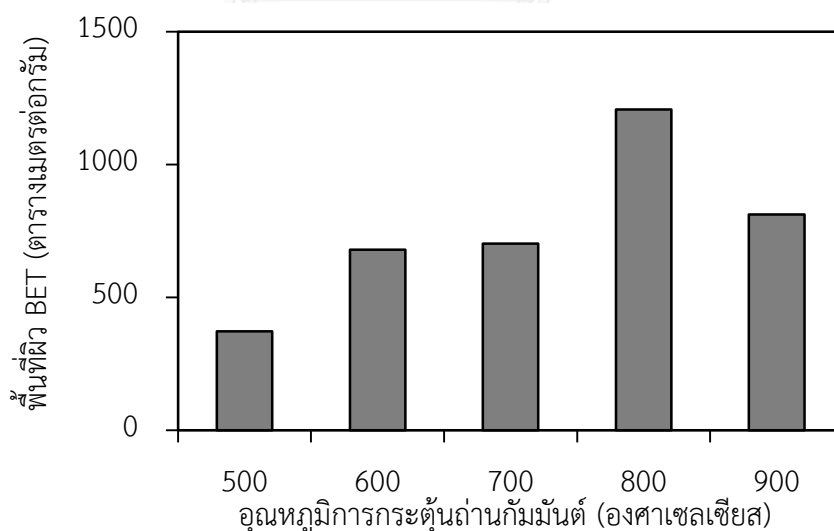


ภาพที่ 4.7 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ต่อปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของ ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสาร กระตุ้นและถ่านชาร์เท่ากับ 1.25 เวลาการดูดซับสารกระตุ้น 24 ชั่วโมง

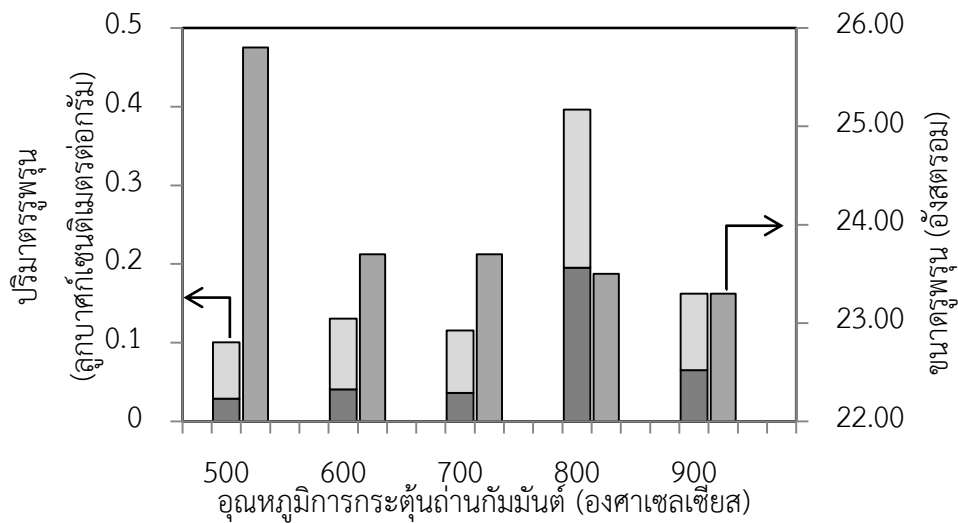
ภาพที่ 4.8-4.9 แสดงผลของอุณหภูมิการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ต่อพื้นที่ผิว BET ปริมาตร รูพรุนและขนาดรูพรุน พบว่าพื้นที่ผิว BET และปริมาตรรูพรุนเพิ่มมากขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการ กระตุ้นจาก 500 เป็น 800 องศาเซลเซียส เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิจะเป็นการเร่งให้โพแทสเซียม ไฮดรอกไซด์เกิดการสลายตัวเป็นโพแทสเซียมออกไซด์และน้ำดังสมการ (4.1) และน้ำที่เกิดขึ้นทำ ปฏิกิริยาต่อเนื่องกับอะตอมคาร์บอนดังสมการ (4.2) ได้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ซึ่งทำปฏิกิริยากับ น้ำดังสมการ (4.3) ได้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจน และระเหยออกจากโครงสร้างของ ถ่านกัมมันต์ ทำให้รูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้นส่งผลถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิว BET และปริมาตรรูพรุนรวมเพิ่ม มากขึ้น และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการกระตุ้นถ่านกัมมันต์จาก 800 เป็น 900 องศาเซลเซียสพื้นที่ผิว BET และปริมาตรรูพรุนรวมจะลดลงในขณะที่ขนาดรูพรุนใหญ่ขึ้น เนื่องจากการใช้อุณหภูมิการกระตุ้น มากกว่า 700 องศาเซลเซียส [33] ทำให้โมเลกุลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มากเกินไปเกิดการ สลายตัวเป็นโพแทสเซียมออกไซด์และทำปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สไฮโดรเจน และ อะตอมของคาร์บอน ดังสมการ (4.4)-(4.6) เกิดเป็นโมเลกุลของโพแทสเซียมคาร์บอเนตและอะตอม

ของโลหะโพแทสเซียม ทั้งโพแทสเซียมคาร์บอเนตและอะตอมของโลหะโพแทสเซียมที่เกิดขึ้นจะเข้าไปแทรกในชั้นของอะตอมคาร์บอน ทำให้โครงสร้างรูพรุนระหว่างชั้นของอะตอมคาร์บอนมีความกว้างมากขึ้น [31] ส่งผลให้พื้นที่ผิว BET และปริมาตรรูพรุนมีแนวโน้มที่ลดต่ำลง นอกจากนี้การกระตุ้นถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิสูงอาจไปทำลายผนังรูพรุนก่อให้เกิดการรวมตัวกันของรูพรุนขนาดเล็กๆ กลายเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ได้ ส่งผลให้ปริมาตรรูพรุนแบบไมโครพอร์และปริมาตรรูพรุนแบบเมโซพอร์มีแนวโน้มลดลง พื้นที่ผิว BET จึงลดลง

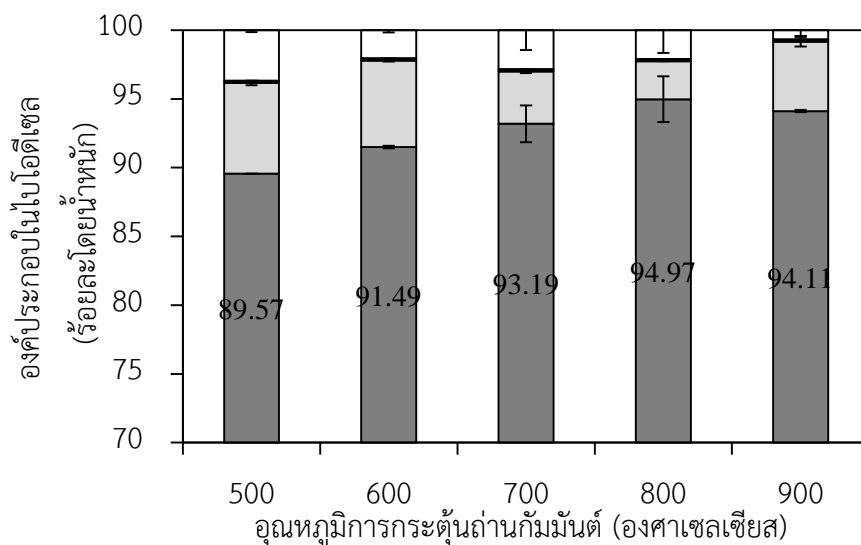
ภาพที่ 4.10 แสดงผลของอุณหภูมิการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อองค์ประกอบในไบโอดีเซลกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 500-900 องศาเซลเซียส พบว่าสัดส่วนเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการกระตุ้นเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิ 500-800 องศาเซลเซียส เนื่องจากหมู่คาร์บอนิลเป็นหมู่ที่มีสมบัติในการรับอิเล็กตรอนได้ดี (Electron acceptor) จึงสามารถรับอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวหรือประจุลบ (Anionic charge) จากสารปนเปื้อนอื่นๆ ในไบโอดีเซล เช่น กลีเซอรอลและกรดไขมันได้ ส่งผลให้สัดส่วนกลีเซอรอลและกรดไขมันอิสระลดลงจากร้อยละ 0.038 เป็นร้อยละ 0.002 และร้อยละ 0.16 เป็นร้อยละ 0.15 ตามลำดับ (ภาพที่ 4.11) ส่วนปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนที่เป็นหมู่กรดจะมีความสามารถทางประจุเป็นลบมีผลต่อการดูดซับสบู่ที่มีความสามารถทางประจุเป็นบวกได้ ทำให้สัดส่วนสบู่และสารปนเปื้อนอื่นในไบโอดีเซลลดลง ส่งผลให้ความบริสุทธิ์หรือสัดส่วนเมทิลเอสเทอร์ของไบโอดีเซลเพิ่มมากขึ้น



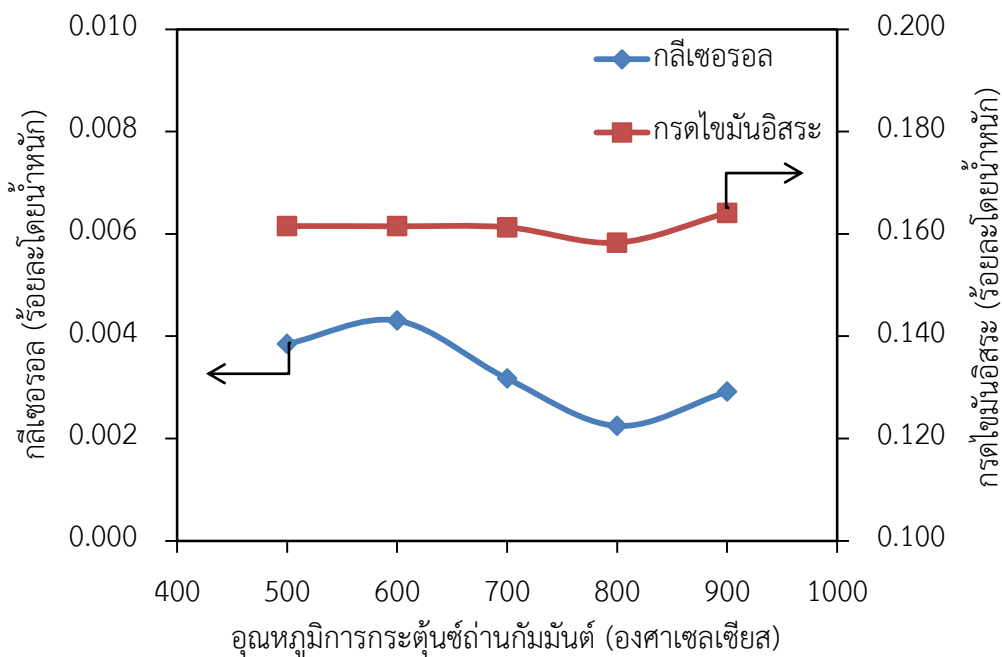
ภาพที่ 4.8 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ต่อพื้นที่ผิว BET ของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์เท่ากับ 1.25 เวลาดูดซับสาร 24 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.9 ผลของอุณหภูมิกการกระตุ้นถั่วลิสงเมล็ดต่อ (■) ปริมาตรรูพรุนแบบไมโครพอร์ (▒) ปริมาตรรูพรุนแบบเมโซพอร์ และ (■) ขนาดรูพรุนของถั่วลิสงเมล็ดที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถั่วลิสงเท่ากับ 1.25 เวลากระตุ้น 24 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.10 ผลของอุณหภูมิกการกระตุ้นถั่วลิสงเมล็ดต่อองค์ประกอบของไขมันโดยการดูด้วยถั่วลิสงเมล็ดที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถั่วลิสงเท่ากับ 1.25 และเวลากระตุ้น 24 ชั่วโมง ดูด้วยสารปนเปื้อนในไขมันที่อัตราส่วนระหว่างถั่วลิสงและไขมันเท่ากับ 7 กรัมต่อลิตรต่อลิตรอัตราค่า 250 รอบต่อนาที เวลาในการดู 60 นาที : (■) เมทิลเอสเทอร์ (▒) สบู่ และ (□) สารปนเปื้อนอื่น



ภาพที่ 4.11 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ต่อปริมาณกลีเซอรอลและกรดไขมันอิสระในไบโอดีเซลที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์เท่ากับ 1.25 และเวลาดูดซับสารกระตุ้น 24 ชั่วโมง ดูดซับสารปนเปื้อนในไบโอดีเซลที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์ และไบโอดีเซลเท่ากับ 7 กรัมต่อลิตร อัตราการเขย่า 250 รอบต่อนาที เวลาในการดูดซับ 60 นาที

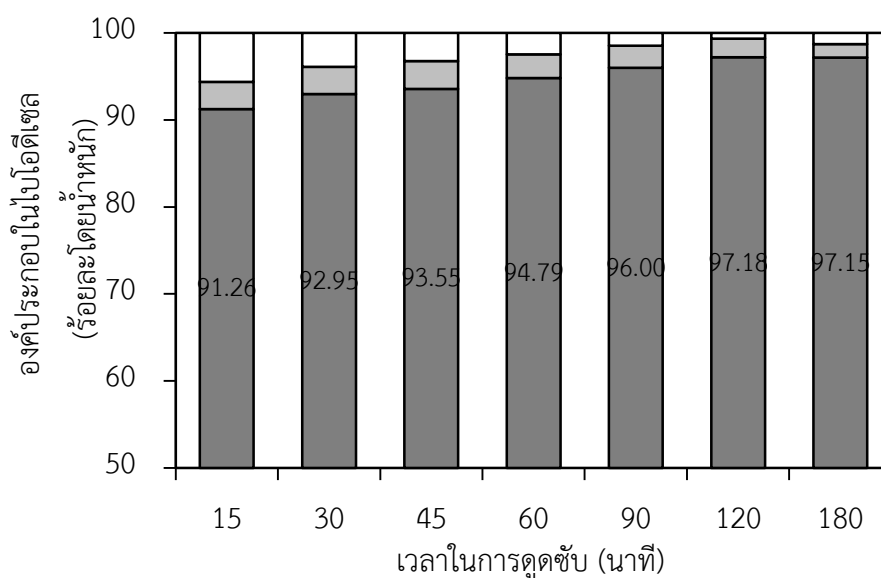
4.3 ภาวะที่เหมาะสมในการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์

จากหัวข้อ 4.2 พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุดโดยการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ คือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์เท่ากับ 1.25 และอุณหภูมิการกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส เมื่อใช้เวลา 60 นาที ในหัวข้อนี้จะศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ ตัวแปรที่ศึกษา คือ อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และไบโอดีเซลที่ใช้ในการดูดซับ เวลาในการดูดซับ และความเร็วยกในการเขย่า

4.3.1 ผลของเวลาในการดูดซับ

ภาพที่ 4.12 แสดงผลของเวลาในการดูดซับต่อองค์ประกอบของไบโอดีเซลที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์ดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกมังคุด พบว่าเมื่อเวลาในการดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 15 เป็น 120 นาที สัดส่วนสบู่และสารปนเปื้อนอื่นๆ ในไบโอดีเซลลดลงจากร้อยละ 3.12 เป็นร้อยละ 2.15

และจากร้อยละ 5.62 เป็นร้อยละ 0.67 ตามลำดับ ส่งผลให้สัดส่วนเมทิลเอสเทอร์ในไบโอดีเซลที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 91.26 เป็น 97.18 เนื่องจากการเพิ่มเวลาในการดูดซับให้มากขึ้น ทำให้โมเลกุลของสารปนเปื้อนและสบู่มีโอกาสในการสัมผัสกับพื้นผิวของถ่านกัมมันต์นานขึ้น และถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ได้มากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มเวลาในการดูดซับจาก 120 นาทีเป็น 180 นาที [34] พบว่าประสิทธิภาพของการดูดซับค่อนข้างคงที่ เนื่องจากถ่านกัมมันต์อาจเกิดการดูดซับสารปนเปื้อนจนถึงจุดอิ่มตัวแล้ว ทำให้ไม่สามารถดูดซับสารปนเปื้อนในไบโอดีเซลได้อีก จึงกล่าวได้ว่าเวลาในการดูดซับที่ดีที่สุดในการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ คือ 120 นาที



ภาพที่ 4.12 ผลของเวลาในการดูดซับต่อองค์ประกอบในการทำไบโอดีเซลที่ผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และไบโอดีเซลเท่ากับ 9 กรัมต่อลิตร ความเร็วรอบในการเขย่า 250 รอบต่อนาที: (■)เมทิลเอสเทอร์ (■) สบู่ และ (□) สารปนเปื้อนอื่น

4.3.2 ผลของอัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และไบโอดีเซล

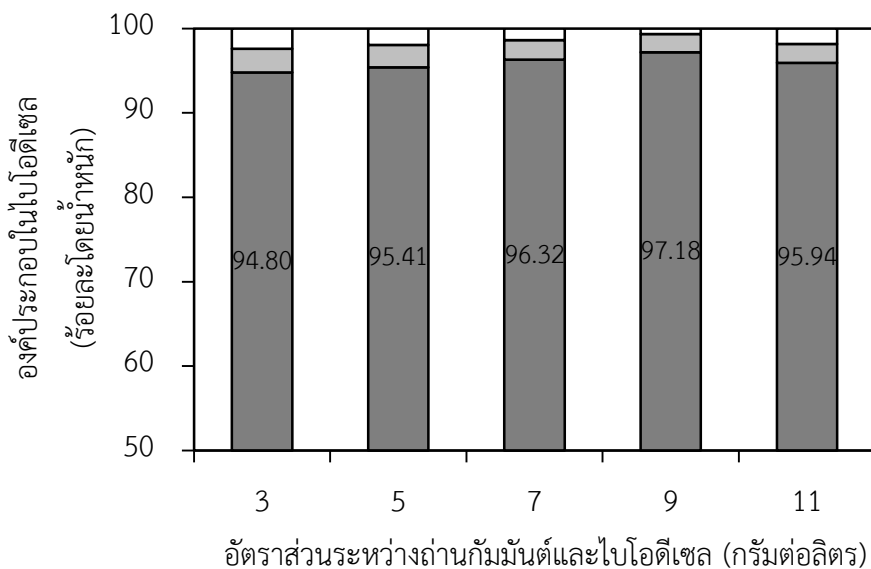
ภาพที่ 4.13 แสดงผลของอัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และไบโอดีเซลที่ใช้ในการดูดซับต่อองค์ประกอบของไบโอดีเซลที่ผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกมังคุดด้วยอัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และไบโอดีเซล 3-11 กรัมต่อลิตร พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และไบโอดีเซลจาก 3 กรัมต่อลิตรเป็น 9 กรัมต่อลิตร จะทำให้สัดส่วนสบู่และสารปนเปื้อนอื่นในไบโอดีเซลลดลงจากร้อยละ 2.80 เป็นร้อยละ 2.15 และจากร้อยละ 2.40 เป็นร้อยละ 0.67

ตามลำดับ ส่งผลให้สัดส่วนเมทิลเอสเทอร์ในไบโอดีเซลที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วย ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 94.80 เป็น 97.18 เนื่องจากการเพิ่มอัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และไบโอดีเซลให้มากขึ้น ทำให้สัดส่วนถ่านกัมมันต์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับมากขึ้น จึงดูดซับสารปนเปื้อนในไบโอดีเซลได้ดีขึ้น ทำให้สบู่และสารปนเปื้อนอื่นในไบโอดีเซลลดลง แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และไบโอดีเซลจาก 9 กรัมต่อลิตรเป็น 11 กรัมต่อลิตร พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับสบู่และสารปนเปื้อนลดลง เนื่องจากปริมาณถ่านกัมมันต์ที่มากเกินไปอาจทำให้ความถี่ในการดูดซับสูงขึ้น ซึ่งอาจไปทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสารปนเปื้อนกับถ่านกัมมันต์ที่เกิดแบบแรงแวนเดอร์วาลส์ซึ่งเป็นแรงอ่อนๆ [25] ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสารปนเปื้อนในไบโอดีเซลลดลง นอกจากนี้ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่มากเกินไปอาจจับตัวเป็นกลุ่มก้อน ทำให้พื้นที่ผิวลดลงประสิทธิภาพในการดูดซับจึงลดลง [35] จึงกล่าวได้ว่าอัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และไบโอดีเซลที่ดีที่สุดในการทำให้ไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ คือ 9 กรัมต่อลิตร

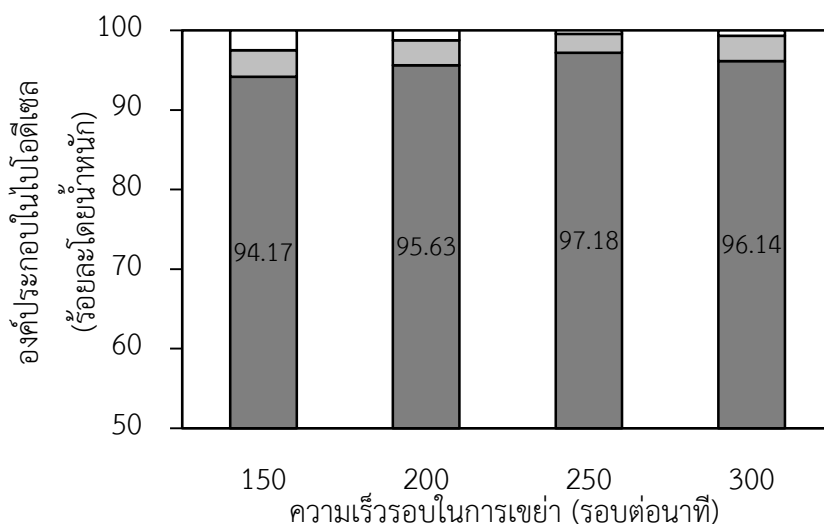
4.3.3 ผลของความเร็วยรอบในการเขย่า

ภาพที่ 4.14 แสดงผลของความเร็วยรอบในการเขย่าต่อความสามารถในการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกมังคุด ที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และไบโอดีเซลเท่ากับ 9 กรัมต่อลิตร เวลาในการดูดซับ 120 นาที ความเร็วยรอบในการเขย่า 150-300 รอบต่อนาที พบว่าความเร็วยรอบการเขย่าในช่วงที่ศึกษามีผลต่อองค์ประกอบในไบโอดีเซล กล่าวคือ เมื่อเพิ่มความเร็วยรอบในการเขย่าจาก 150 เป็น 250 รอบต่อนาที ทำให้สัดส่วนสบู่และสารปนเปื้อนอื่นในไบโอดีเซลลดลงจากร้อยละ 3.35 เป็นร้อยละ 2.36 และจากร้อยละ 2.48 เป็นร้อยละ 0.46 ตามลำดับ ส่งผลให้สัดส่วนเมทิลเอสเทอร์ในไบโอดีเซลที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วย ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกมังคุดเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 94.17 เป็นร้อยละ 97.18 เนื่องจากการเพิ่มความเร็วยรอบในการเขย่า ทำให้สารมีโอกาสเกิดการสัมผัสกันมากขึ้นความหนาของชั้นการแพร่ (Diffusion layer) ที่ปกคลุมอนุภาคของถ่านกัมมันต์ลดลง โมเลกุลของสารปนเปื้อนในไบโอดีเซลจึงสามารถแพร่เข้าไปในอนุภาคของถ่านกัมมันต์ได้ง่าย จึงทำให้ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับสารปนเปื้อนในไบโอดีเซลได้ดีขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความเร็วยรอบในการเขย่าจาก 250 เป็น 300 รอบต่อนาที สัดส่วนสบู่และสารปนเปื้อนอื่น ๆ ในไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 2.36 เป็นร้อยละ 3.18 และจากร้อยละ 0.46 เป็นร้อยละ 0.68 ตามลำดับ ส่งผลให้สัดส่วนเมทิลเอสเทอร์ในไบโอดีเซลที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกมังคุดลดลงจากร้อยละ 97.18 เป็นร้อยละ 96.14 เนื่องจากความเร็วยรอบในการเขย่าเพิ่มมากขึ้น สารก็มีโอกาสเกิดการชนกันแรงมากจนมีแรงเฉือนเกิดขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ลดลง เนื่องจากโมเลกุลของสารไม่

สามารถเกาะกันได้ [26] จึงกล่าวได้ว่าความเร็วรอบในการเขย่าที่เหมาะสมในการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์คือ 250 รอบต่อนาที



ภาพที่ 4.13 ผลของอัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และไบโอดีเซลต่อองค์ประกอบในไบโอดีเซลที่ผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เวลาในการดูดซับ 120 นาที ความเร็วรอบในการเขย่า 250 รอบต่อนาที: (■) เมทิลเอสเทอร์ (■) สบู่ และ (□) สารปนเปื้อนอื่นๆ



ภาพที่ 4.14 ผลของความเร็วรอบในการเขย่าต่อองค์ประกอบในไบโอดีเซลที่ผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ดูดซับที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และไบโอดีเซลเท่ากับ 9 กรัมต่อลิตร เวลาในการดูดซับ 120 นาที: (■) เมทิลเอสเทอร์ (■) สบู่ และ (□) สารปนเปื้อนอื่นๆ

ตารางที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกมังคุดที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์กับการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ พบว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกมังคุดที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์เท่ากับ 1.25 อุณหภูมิการกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส ดูดซับที่อัตราส่วนระหว่างถ่านชาร์และไบโอดีเซลเท่ากับ 9 กรัมต่อลิตร เวลาในการดูดซับ 120 นาที ความเร็วรอบในการเขย่า 250 รอบต่อนาที มีประสิทธิภาพในการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์สูงกว่าถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ โดยสามารถเพิ่มสัดส่วนเมทิลเอสเทอร์จากร้อยละ 94.17 เป็นร้อยละ 97.18 โดยน้ำหนัก เนื่องจากถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกมังคุดมีพื้นที่ผิว BET และหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ (หมู่คาร์บอนิล) มากกว่าถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์เป็น 1.05 และ 1.62 เท่า ตามลำดับ (ตารางที่ 4.6) นอกจากนี้ยังสามารถลดสัดส่วนสารปนเปื้อนอื่นๆ ในไบโอดีเซล เช่น กลีเซอรอล สบู่ กรดไขมันอิสระได้อีกด้วย โดยสัดส่วนสารปนเปื้อนดังกล่าวอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ตามมาตรฐานที่กรมธุรกิจพลังงานกำหนด ทำให้ได้ไบโอดีเซลที่ได้มีสมบัติพร้อมที่จะนำไปใช้เป็นพลังงานเชื้อเพลิงทดแทนการใช้พลังงานเชื้อเพลิงดีเซลเพียงอย่างเดียวได้ และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการทำไบโอดีเซลดิบให้บริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกมังคุดที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์เท่ากับ 1.25 อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส กับการล้างแบบเปียก พบว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกมังคุดที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์เท่ากับ 1.25 อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพในการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์สูงกว่าการล้างแบบเปียกเช่นเดียวกัน สังเกตได้จากสัดส่วนเมทิลเอสเทอร์ที่มากกว่าการล้างแบบเปียก (ตารางที่ 4.6) และยังมีข้อดีว่าการล้างแบบเปียกคือ ไม่ก่อให้เกิดน้ำเสียจากกระบวนการล้าง ซึ่งเป็นการลดต้นทุนในการบำบัดและเป็นการลดปัญหาสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

ตารางที่ 4.5 สมบัติเบื้องต้นของไบโอดีเซลที่ดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์และถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกมังคุด

สมบัติของไบโอดีเซล	EN 14214	ไบโอดีเซล	ไบโอดีเซลโดยกระบวนการดูดซับด้วย		
			ถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์	การล้างแบบเปียก	ถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุด
เมทิลเอสเทอร์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	> 96.5	87.50 ± 0.021	97.01 ± 0.01	96.03 ± 0.04	97.18 ± 0.01
กลีเซอรอล (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	< 0.02	0.033 ± 0.006	0.003 ± 0.00	0.003 ± 0.000	< 0.02
สบู่ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	NA	4.59 ± 0.32	2.30 ± 0.03	2.38 ± 0.03	2.15 ± 0.08
กรดไขมันอิสระ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	< 0.2	0.257 ± 0.005	0.176 ± 0.00	0.176 ± 0.000	0.17
น้ำ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	< 0.05	0.35	0.14	0.2	0.02
ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	0.86 - 0.90	0.87 ± 0.0014	0.88 ± 0.007	0.88 ± 0.007	0.88 ± 0.002
จุดวาบไฟ (องศาเซลเซียส)	> 120	188 ± 0.002	187 ± 0.001	180 ± 0.001	186 ± 0.001
ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (เซนติสโตกส์)	3.5-5	4.11 ± 0.0035	4.25 ± 0.01	4.64 ± 0.002	4.54 ± 0.004
ค่าความเป็นกรด (มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม)	<0.5	0.511 ± 0.01	0.35 ± 0.02	0.35 ± 0.02	0.35 ± 0.00
เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส (ชั่วโมง)	> 6	1.9	3.1	3.8	4.9

ตารางที่ 4.6 สมบัติของถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์และถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกมังคุดและ
ความสามารถในการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์

ประเภท ถ่านกัมมันต์	พื้นที่ผิว BET	ค่า ไอโอดีน	ปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิว (มิลลิกรัมต่อกรัม)				ความบริสุทธิ์ ไบโอดีเซลดิบ
			หมู่ ไฮดรอกซิล	หมู่ คาร์บอกซิล	หมู่ แลคโตน	หมู่ คาร์บอนิล	
ถ่านกัมมันต์ เชิงพาณิชย์	1,152	1,987	0.90±0.07	1.45±0.12	0.28±0.05	7.16±0.08	97.01± 0.01
ถ่านกัม มันต์จาก เปลือก มังคุด	1,207	1,900	0.64±0.01	1.85±0.03	0.20±0.11	11.62±0.03	97.18± 0.01

ตารางที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกมังคุดที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์กับการดูดซับด้วยแมกนีซอล [20] และถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากชา [2] พบว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกมังคุดที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์เท่ากับ 1.25 อุณหภูมิการกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส ดูดซับที่อัตราส่วนระหว่างถ่านชาร์และไบโอดีเซลเท่ากับ 9 กรัมต่อลิตร เวลาในการดูดซับ 120 นาที ความเร็วรอบในการเขย่า 250 รอบต่อนาที มีประสิทธิภาพในการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์สูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากชาเล็กน้อย แต่มีประสิทธิภาพในการการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์สูงกว่าสูงกว่าแมกนีซอลอย่างชัดเจน (สูงกว่า 1.07 เท่า) เนื่องจากถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกมังคุดมีหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์มากกว่าแมกนีซอล ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนมากกว่าแมกนีซอลจึงสามารถดูดซับสารปนเปื้อนต่างๆ ในไบโอดีเซล เช่น สบู่และกรดไขมันอิสระได้ ทำให้ไบโอดีเซลที่ได้มีความบริสุทธิ์สูงกว่าเมื่อเทียบกับการดูดซับด้วยแมกนีซอล

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์โดยการดูดซับ

งานวิจัย	ตัวดูดซับ	สมบัติของไบโอดีเซล				
		เมทิลเอสเทอร์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	สบู่ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (เซนติสโตกส์)	ค่าความเป็นกรด (มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม)
Berrios และคณะ (2011)	แมกนีซอล	90.9	0.00004	0.88	5.06	0.27
Fadhil และคณะ (2012)	ถ่านกัมมันต์จากกากชา	97	-	0.88	2.63	0.092
งานวิจัยนี้	ถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุด	97.18	2.15	0.88	4.54	0.35

4.4 ไอโซเทิร์มการดูดซับของถ่านกัมมันต์

ไอโซเทิร์มการดูดซับเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับและปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกมังคุด ไอโซเทิร์มที่นิยมใช้อธิบายการดูดซับมี 2 ชนิด คือ ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์และไอโซไอโซเทิร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช โดยไอโซเทิร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ทำนายว่าพลังงานในการดูดซับมีค่าคงที่และไม่ขึ้นกับสมบัติของพื้นที่ผิว การซับจะเกิดเฉพาะที่โมเลกุลเดียวโดยไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับ [36] สามารถเขียนอยู่ในรูปสมการเส้นตรงได้

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{k_L q_0} + \frac{C_e}{q_0} \quad (4.7)$$

โดยที่ q_e คือ ปริมาณการดูดซับที่ภาวะสมดุล k_L คือ ค่าคงที่แลงเมียร์ C_e คือ ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับคงเหลือที่ภาวะสมดุลและ q_0 คือ ปริมาณการดูดซับสูงสุดที่สอดคล้องกับการดูดซับแบบชั้นเดียวอย่างสมบูรณ์

เมื่อนำสมการที่ 4.7 มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C_e/q_e และ C_e จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันและจุดตัดแกนเป็น $1/q_0$ และ $1/k_L q_0$ ตามลำดับ ค่า k_L ที่ได้จากแบบจำลองการดูดซับแบบแลงเมียร์ สามารถใช้ในการคาดเดาปัจจัยการแยกขนาดคงที่ได้ (R_L) ดังสมการ (4.8) ถ้าค่า $R_L > 1$ แสดงว่าการดูดซับเกิดขึ้นได้ไม่ดี และถ้าค่า R_L อยู่ระหว่าง 0-1 แสดงว่าการดูดซับเกิดขึ้นได้

ในขณะที่ค่า $R_L = 1$ และ $R_L = 0$ แสดงการดูดซับแบบเส้นตรงและการดูดซับแบบผันกลับไม่ได้ตามลำดับ [37]

$$R_L = \frac{1}{1 + k_L C_0} \quad (4.8)$$

โดย C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับ

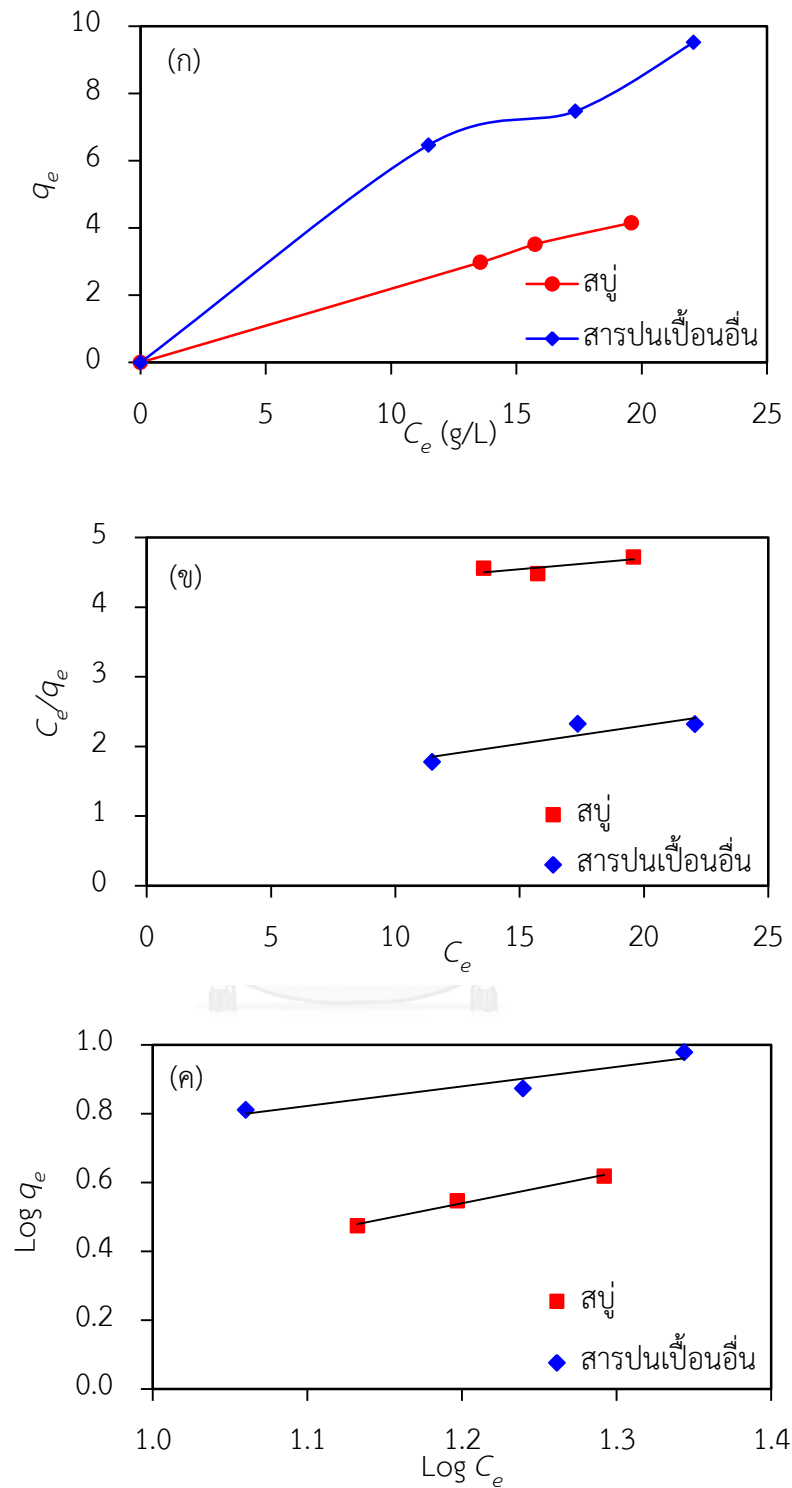
ส่วนแบบจำลองการดูดซับตามสมการฟรุนดิชเกิดจากสมมติฐานการดูดซับจากพื้นผิวหลายชั้น (Multi-layer adsorption) และมีการกระจายตัวแบบไม่สม่ำเสมอของความร้อนของการดูดซับบนพื้นผิวที่เกิดจากการดูดซับแบบหลายชั้น สมการฟรุนดิชอธิบายถึงการลดลงแบบเอ็กโพเนนเชียลของพลังงานการดูดซับบนจุดสมดุลของจุดศูนย์กลางการดูดซับของตัวดูดซับ สมการเส้นตรงของไอโซเทิร์มการดูดซับแบบฟรุนดิช แสดงดังสมการ (4.9)

$$\log q_e = \log k_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (4.9)$$

โดย k_F คือ ค่าคงที่ฟรุนดิชแสดงถึงปริมาณการดูดซับ และ n คือ ความหนาแน่นในการดูดซับ

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q_e$ และ $\log C_e$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มี k_F เป็นจุดตัดแกนและ $1/n$ เป็นความชัน การดูดซับแบบฟรุนดิชจะเกิดขึ้นได้ดีเมื่อ $1/n$ อยู่ในช่วง 0.1-1 [38]

รูปที่ 4.15 (ก) แสดงสมดุลการดูดซับของสบู่อและสารปนเปื้อนในไบโอดีเซลโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกมังคุดโดยการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เมื่อเขียนกราฟเส้นตรงของสบู่อและสารปนเปื้อน ตามแบบจำลองการดูดซับแบบแลงเมียร์และฟรุนดิช ดังภาพที่ 4.15 (ข) และ (ค) ตามลำดับ พบว่าแบบจำลองการดูดซับแบบฟรุนดิชเหมาะสำหรับการดูดซับสบู่อและสารปนเปื้อนในไบโอดีเซล เนื่องการดูดซับเกิดขึ้นหลายชั้น สังเกตจากค่า $1/n$ จะอยู่ในช่วง $0.1 < 1/n < 1$ และร้อยละความคลาดเคลื่อน (R^2) (ตารางที่ 4.7) ของแบบจำลองการดูดซับแบบฟรุนดิชมีค่าเท่ากับ 0.9151 ซึ่งมากกว่าแบบจำลองการดูดซับแบบแลงเมียร์ แสดงว่าแบบจำลองการดูดซับสบู่อและสารปนเปื้อนในไบโอดีเซลด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกมังคุดโดยการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ คือ แบบจำลองของฟรุนดิชซึ่งเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น



ภาพที่ 4.15 (ก) สมดุลการดูดซับและกราฟเชิงเส้นของไอโซเทิร์ม (ข) แลงเมียร์ และ (ค) ฟรุนดิช สำหรับการดูดซับสบู่และสารปนเปื้อนในโพลีไอโซบิวทีลีนที่ดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกมังคุดที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์เท่ากับ 1.25 ที่อุณหภูมิการกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.8 ค่าคงที่แลงเมียร์และพรุนดิชสำหรับสบูและสารปนเปื้อนอื่นในการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกมังคุด

ตัวแปรที่ศึกษา	ค่าคงที่แลงเมียร์			R_L	ค่าคงที่พรุนดิช		
	q_0 (g/g)	k_L (L/g)	R^2		k_F (L/g)	$1/n$	R^2
สบู่	0.245	131.5	0.5890	0.0300	0.2926	0.8944	0.9880
สารปนเปื้อนอื่น	0.805	23.51	0.7965	0.0502	1.5831	0.5665	0.9151

4.5 จลนพลศาสตร์การดูดซับ

การศึกษาอัตราเร็วปฏิกิริยาของการดูดซับสบูและสารปนเปื้อนในไบโอดีเซลติดด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกมังคุดจะใช้แบบจำลองอันดับหนึ่งเทียมและแบบจำลองอันดับสองในการอธิบาย ดังนี้

แบบจำลองอันดับหนึ่งเทียมแสดงดังสมการที่ (4.10)

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1 (q_e - q_t) \quad (4.10)$$

เมื่ออินทิเกรตสมการที่ (4.10) ที่ภาวะ $t = 0$ ถึง $t = t$ และ $q_t = 0$ ถึง $q_t = q_t$ สมการเส้นตรงของแบบจำลองอันดับหนึ่งเทียมแสดงดังสมการที่ (4.11)

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1 (q_e - q_t) \quad (4.11)$$

เมื่อ q_t หมายถึงความสามารถในการดูดซับสบูและสารปนเปื้อนในไบโอดีเซลของถ่านกัมมันต์ที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม) k_1 หมายถึง ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง (ต่อนาที) และ t หมายถึงเวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

เมื่อนำข้อมูลมาเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง $\log (q_e - q_t)$ กับ t จะได้กราฟเส้นตรง ค่าคงที่อัตราเร็วของ แบบจำลองอันดับหนึ่งเทียม (k_1) หาได้จากความชันของเส้นตรง ส่วนความสามารถในการดูดซับ ($q_{e,cal}$) จากสมการ แบบจำลองอันดับหนึ่งเทียมหาได้จากจุดตัดของสมการเส้นตรง

สมการของแบบจำลองอันดับสองแสดงดังสมการที่ (4.12)

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2 (q_e - q_t)^2 \quad (4.12)$$

อินทิเกรตสมการที่ (4.12) ที่ภาวะ $t = 0$ ถึง $t = t$ และ $q_t = 0$ ถึง $q_t = q_t$ สมการเส้นตรงของแบบจำลองอันดับสองแสดงได้ดังสมการที่ (4.13)

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (4.13)$$

เมื่อ k_2 หมายถึง ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่สอง (กรัมต่อมิลลิกรัม-นาท)

นำข้อมูลมาเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง t/q_t กับ t จะได้กราฟเส้นตรง ค่าคงที่อัตราเร็วของแบบจำลองอันดับสอง (k_2) หาได้จากความชันของเส้นตรง

ภาพที่ 4.16 แสดงจลนศาสตร์การดูดซับและสารปนเปื้อนอื่นในไบโอดีเซล ค่าของตัวแปรที่คำนวณได้จากความชันและจุดตัดแกน y ของภาพที่ 4.16 (ก) และ (ข) แสดงในตารางที่ 4.8 พบว่าค่า R^2 ของสมการจลนศาสตร์อันดับสองมีค่าสูงกว่าค่า R^2 ของสมการจลนศาสตร์อันดับหนึ่งเทียมความสามารถในการดูดซับและสารปนเปื้อนอื่นในไบโอดีเซลที่ภาวะสมดุล (q_e) ที่คำนวณจากสมการจลนศาสตร์อันดับสองมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าค่าที่คำนวณจากสมการจลนศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม ความคลาดเคลื่อน (D) ของค่าปริมาณการดูดซับที่ภาวะสมดุลที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองมีค่าเพียง 2.35 และ 8.6 สำหรับสบู่และสารปนเปื้อนอื่น ตามลำดับ แสดงว่าการดูดซับและสารปนเปื้อนอื่นในไบโอดีเซลด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกมังคุดเป็นไปตามจลนศาสตร์อันดับสอง แสดงให้เห็นว่าการดูดซับขึ้นกับสารตั้งต้น 2 ตัวซึ่งเป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงทางเคมีที่เกิดจากการใช้ไอเล็กตรอนร่วมกันของสบู่และสารปนเปื้อนอื่นๆ ในไบโอดีเซลกับถ่านกัมมันต์

การศึกษากลไกที่ควบคุมการดูดซับและสารปนเปื้อนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกมังคุดจะดำเนินการโดยใช้แบบจำลองการแพร่ภายใน (Intraparticle diffusion model) ซึ่งแสดงค่าสมการ (4.14)

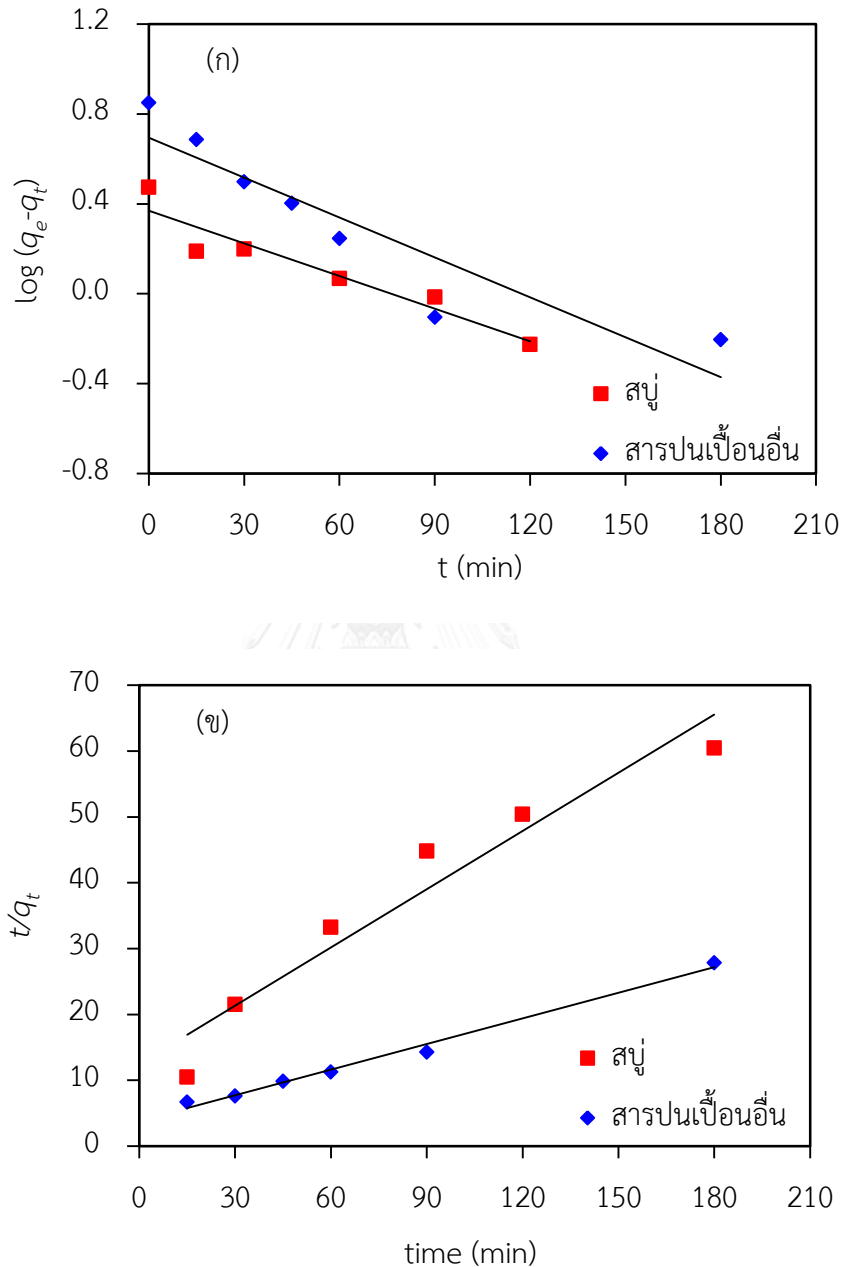
$$q_t = k_i t^{0.5} \quad (4.14)$$

โดย k_i คือ ค่าคงที่อัตราการแพร่ของอนุภาค

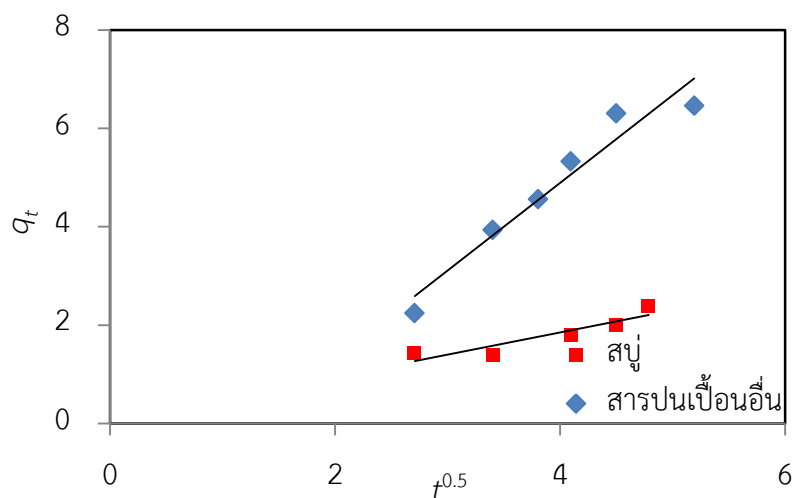
เมื่อเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง q_t กับ $t^{0.5}$ ของสมการ (4.14) แล้วได้กราฟเส้นตรง แสดงว่าการดูดซับสารปนเปื้อนถูกควบคุมด้วยกระบวนการแพร่

ภาพที่ 4.17 แสดงจลนพลศาสตร์การดูดซับของสบู่และสารปนเปื้อนอื่นในไบโอดีเซลที่คำนวณได้จากความชันและจุดตัดแกน y พบว่าค่าคงที่อัตราการแพร่ของสบู่และสารปนเปื้อนอื่นมีค่า 0.9685 และ 0.9976 และจุดตัดแกน y มีค่า 0.2081 และ 0.5841 กรัม / กรัม นาที่^{0.5} ตามลำดับ

แสดงว่าการดูดซับของสบู่อและสารปนเปื้อนอื่นในไบโอดีเซลด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมเปลือกมังคุดถูกควบคุมด้วยการแพร่ของสบู่อและสารปนเปื้อนอื่นจากไบโอดีเซลไปยังพื้นผิวของถ่านกัมมันต์



ภาพที่ 4.16 จลนศาสตร์การดูดซับสบู่อและสารปนเปื้อนอื่นในไบโอดีเซลด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกมังคุดที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์เท่ากับ 1.25 ที่อุณหภูมิการกระตุ้น 80 องศาเซลเซียส เมื่อใช้แบบจำลอง (ก) อันดับหนึ่งเทียมและ (ข) อันดับสอง



ภาพที่ 4. 17 จลนพลศาสตร์การดูดซับสบู่และสารปนเปื้อนอื่นในไบโอดีเซลด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกมังคุดที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์เท่ากับ 1.25 ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ดูดซับที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และไบโอดีเซล 9 กรัมต่อลิตร

ตารางที่ 4.9 ค่าคงที่อัตราเร็วของการดูดซับสบู่และสารปนเปื้อนอื่นๆ ในไบโอดีเซลด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกมังคุดเมื่อใช้จลนศาสตร์อันดับหนึ่งเทียมและจลนศาสตร์อันดับสอง

ลักษณะ	$q_{e,exp}$ (g/g)	จลนศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม				จลนศาสตร์อันดับสอง			
		k_1 (min^{-1})	$q_{e,cal}$ (g/g)	R^2	D^n (%)	k_2 (g/g-min)	$q_{e,cal}$ (g/g)	R^2	D^n (%)
Soap	2.98	0.0111	2.34	0.9051	21.48	0.0083	3.05	0.9651	2.35
Other	7.09	0.0136	4.95	0.8472	30.18	0.0044	7.70	0.9902	8.60

ⁿ ความความคลื่อนระหว่าง $q_{e,exp}$ และ $q_{e,cal}$ คำนวณจาก $((q_{e,exp} - q_{e,cal}) / q_{e,exp}) \times 100$ เมื่อ $q_{e,exp}$ คือ ปริมาณการดูดซับที่ภาวะสมดุลจากการทดลอง และ $q_{e,cal}$ คือปริมาณการดูดซับที่ภาวะสมดุลจากการคำนวณ

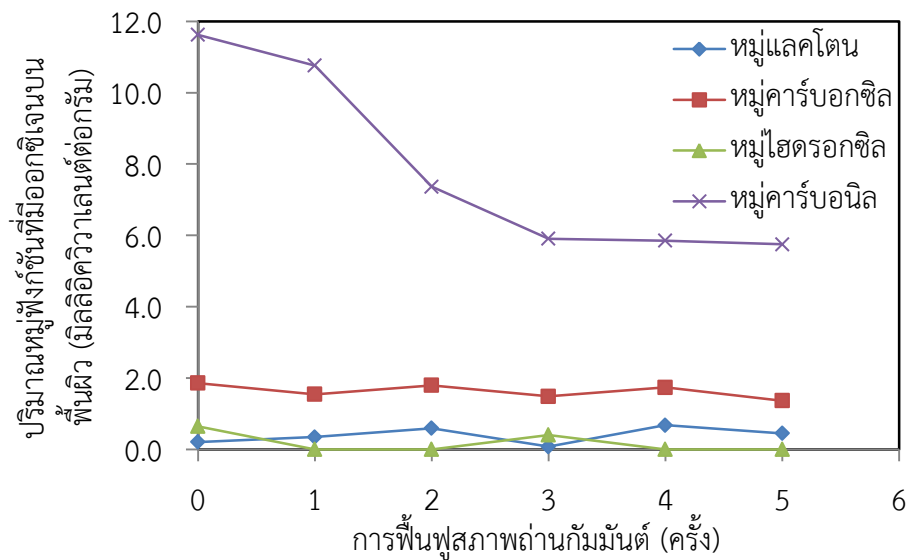
4.6 การฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์

การฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการใช้งานจะดำเนินการตามงานวิจัยที่ผ่านมา [26] โดยนำถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการใช้งานแล้วไปแช่ในเฮกเซนที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรระหว่างสารเคมีและถ่านกัมมันต์เท่ากับ 3 ให้ความร้อนในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตติงภายใต้ภาวะแก๊สไนโตรเจนที่

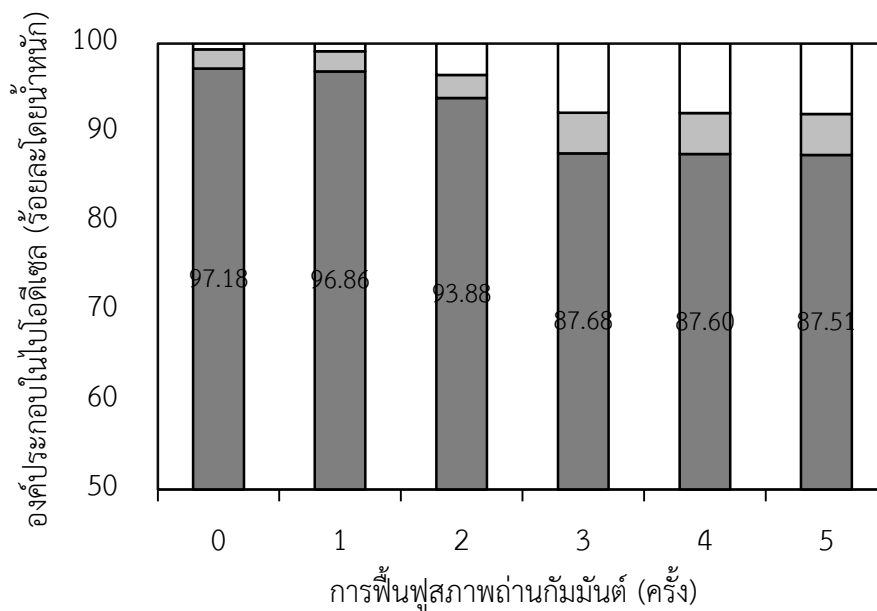
อัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และคงที่ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที จากนั้นนำถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพมาดูดซับสารปนเปื้อนในไบโอดีเซลที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และไบโอดีเซลเท่ากับ 9 กรัมต่อลิตร เวลาในการดูดซับ 120 นาที และความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที

ภาพที่ 4.18 แสดงปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยเฮกเซน พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยเฮกเซนครั้งที่ 1 จะมีปริมาณหมู่คาร์บอนิลลดลงเป็น 10.76 มิลลิอิกวิวาเลนต์ต่อกรัม และจะลดลงจนเกือบคงที่เมื่อผ่านการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ครั้งที่ 5 จำนวนครั้งในการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ไม่ส่งผลต่อปริมาณหมู่กรด เช่น หมู่แลคโตน หมู่คาร์บอกซิล และหมู่ไฮดรอกซิลอย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน

ภาพที่ 4.19 แสดงองค์ประกอบของไบโอดีเซลที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยเฮกเซนและความร้อนที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรระหว่างสารเคมีและถ่านกัมมันต์เท่ากับ 3:1 พบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนครั้งในการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ความสามารถในการดูดซับสิ่งปนเปื้อนในไบโอดีเซลลดลง ส่งผลให้ไบโอดีเซลที่ผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยเฮกเซนมีสัดส่วนเมทิลเอสเทอร์ลดลงจากร้อยละ 97.18 เป็นร้อยละ 87.51 ซึ่งจะสอดคล้องกับการลดลงของหมู่คาร์บอนิลบนพื้นผิว จากผลการทดลองจึงกล่าวได้ว่า ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกมังคุดโดยการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์สามารถใช้ซ้ำได้ 1 ครั้ง เมื่อผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยเฮกเซนและความร้อนซึ่งยังมีประสิทธิภาพในการดูดซับสบู่และสารปนเปื้อนในไบโอดีเซล และให้มีสัดส่วนเมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 96.86 ซึ่งยังมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กรมธุรกิจพลังงานกำหนด



ภาพที่ 4.18 การฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ด้วยเฮกเซนและความร้อนต่อปริมาณหมู์ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการใช้งานแล้ว ดูดซับที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และไบโอดีเซลเท่ากับ 9 กรัมต่อลิตร อัตราการเขย่า 250 รอบต่อนาที เวลาในการดูดซับ 120 นาที



ภาพที่ 4.19 การฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ด้วยเฮกเซนและความร้อนต่อองค์ประกอบของไบโอดีเซลที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยเฮกเซน: (■) เมทิลเอสเทอร์ (■) สบู่และ (□) สารปนเปื้อน : หมายเหตุ การฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ครั้งที่ 0 คือ ถ่านกัมมันต์ใหม่

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุดและภาวะที่เหมาะสมในการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกมังคุด โดยถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์เท่ากับ 1.25 เวลา กระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ส่งผลต่อปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ โดยเฉพาะหมู่คาร์บอนิลจะมีมากขึ้นเป็น 11.62 มิลลิกรัมวาลেন্টต่อกรัม ซึ่งหมู่ดังกล่าวเป็นหมู่เบสและมีสภาพผิวเป็นประจุบวก จึงสามารถดูดซับสารปนเปื้อนในไบโอดีเซล ส่งผลให้ไบโอดีเซลมีความบริสุทธิ์มากขึ้น และยังส่งผลต่อพื้นที่ผิว BET และปริมาตรรูพรุน กล่าวคือ สามารถเพิ่มพื้นที่ผิว BET และปริมาตรรูพรุนมากขึ้น ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกมังคุดโดยการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ดูดซับสารปนเปื้อนในไบโอดีเซลที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และไบโอดีเซลเท่ากับ 9 กรัมต่อลิตร เวลาในการดูดซับ 120 นาที และความเร็วรอบในการเขย่า 250 รอบต่อนาที สามารถลดสัดส่วนสบู่และสารปนเปื้อนในไบโอดีเซลทำให้ไบโอดีเซลมีความบริสุทธิ์หรือมีสัดส่วนเมทิลเอสเทอร์สูงถึงร้อยละ 97.18 ไนโตรเจนการดูดซับสบู่และสารปนเปื้อนอื่นในไบโอดีเซลเป็นแบบจำลองของฟรุนดิช และมีจลนศาสตร์การดูดซับอันดับสอง โดยกระบวนการดูดซับถูกควบคุมด้วยกระบวนการแพร่ นอกจากนี้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกมังคุดโดยการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์สามารถใช้ซ้ำได้ 1 ครั้ง เมื่อผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยเฮกเซนและความร้อนซึ่งยังมีประสิทธิภาพในการดูดซับสบู่และสารปนเปื้อนในไบโอดีเซลให้มีสัดส่วนเมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 96.86 ซึ่งยังมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กรมธุรกิจพลังงานกำหนด

5.2 ข้อเสนอแนะ

- ควรมีการเปรียบเทียบต้นทุนของวิธีการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ระหว่างกระบวนการล้างแบบแห้งและกระบวนการล้างแบบเปียก
- ควรศึกษาการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการใช้งานแล้วด้วยการเผาที่อุณหภูมิสูงมากกว่า 1,000 องศาเซลเซียส ในแก๊สเฉื่อยเพื่อเพิ่มความสามารถในการดั่งสารที่ดูดซับบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์
- ศึกษาวิธีการกำจัดถ่านกัมมันต์ที่ไม่ได้ใช้งานแล้ว โดยนำถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการใช้งานแล้วไปเผาเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงต่อไป

รายการอ้างอิง

1. Galadima, A. and O. Muraza, *Biodiesel production from algae by using heterogeneous catalysts: A critical review*. Energy, 2014. **78**: p. 72-83.
2. Fadhil, A.B., M.M. Dheyab, and A.-Q.Y. Abdul-Qader, *Purification of biodiesel using activated carbons produced from spent tea waste*. Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences, 2012. **11**(1): p. 45-49.
3. พลัฒพลา, ส., การสาธิตการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว. 2011, .
4. Veljković, V.B., J.M. Avramović, and O.S. Stamenković, *Biodiesel production by ultrasound-assisted transesterification: State of the art and the perspectives*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012. **16**(2): p. 1193-1209.
5. วิฑิตศานต์, ธ., ถ่านกัมมันต์ การผลิตและการนำไปใช้. 2545.
6. Karl. กระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ผ่านการใช้งานแล้ว. 2011; Available from: www.makebiofuel.co.uk.
7. Niza, N.M., et al., *Influence of impurities on biodiesel production from *Jatropha curcas* L. by supercritical methyl acetate process*. The Journal of Supercritical Fluids, 2013. **79**(0): p. 73-75.
8. ทองอุไร, ช., เทคนิคการผลิตไบโอดีเซลให้ได้คุณภาพ. 2553, ศูนย์บริการวิชาการที่ 3 (จังหวัดมหาสารคาม). p. 1-29.
9. Stojković, I.J., et al., *Purification technologies for crude biodiesel obtained by alkali-catalyzed transesterification*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014. **32**: p. 1-15.
10. Lillo-Ródenas, M.A., et al., *Activated carbons prepared by pyrolysis of mixtures of carbon precursor/alkaline hydroxide*. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2007. **80**(1): p. 166-174.
11. Minoda, A., et al., *Synthesis of KOH-activated porous carbon materials and study of hydrogen adsorption*. Journal of Alloys and Compounds, 2013. **580**: p. S301-S304.

12. Guo, J. and A.C. Lua, *Surface Functional Groups on Oil-Palm-Shell Adsorbents Prepared by H₃PO₄ and KOH Activation and their Effects on Adsorptive Capacity*. Chemical Engineering Research and Design, 2003. **81**(5): p. 585-590.
13. Li, N., et al., *Maximizing the number of oxygen-containing functional groups on activated carbon by using ammonium persulfate and improving the temperature-programmed desorption characterization of carbon surface chemistry*. Carbon, 2011. **49**(15): p. 5002-5013.
14. Pereira, M.F.R., et al., *Adsorption of dyes on activated carbons: influence of surface chemical groups*. Carbon, 2003. **41**(4): p. 811-821.
15. Faria, P.C., J.J. Orfao, and M.F. Pereira, *Adsorption of anionic and cationic dyes on activated carbons with different surface chemistries*. Water Res, 2004. **38**(8): p. 2043-52.
16. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ส. การออกแบบการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์. 2549; Available from: http://www.pcd.go.th/info_serv/Datasmell/design_absorbtion.htm.
17. Berrios, M. and R.L. Skelton, *Comparison of purification methods for biodiesel*. Chemical Engineering Journal, 2008. **144**(3): p. 459-465.
18. Predojević, Z.J., *The production of biodiesel from waste frying oils: A comparison of different purification steps*. Fuel, 2008. **87**(17-18): p. 3522-3528.
19. Manique, M.C., et al., *Rice husk ash as an adsorbent for purifying biodiesel from waste frying oil*. Fuel, 2012. **92**(1): p. 56-61.
20. Berrios, M., et al., *Purification of biodiesel from used cooking oils*. Applied Energy, 2011. **88**(11): p. 3625-3631.
21. Manuale, D.L., et al., *Biodiesel purification in one single stage using silica as adsorbent*. Chemical Engineering Journal, 2014. **256**: p. 372-379.
22. Gomes, M.G., et al., *Purification of biodiesel by dry washing, employing starch and cellulose as natural adsorbents*. Fuel, 2015. **155**: p. 1-6.
23. Escorsim, A.M., et al., *Assessment of biodiesel purification using CO₂ at high pressures*. The Journal of Supercritical Fluids, 2015. **96**(0): p. 68-76.
24. Ahmad, M.A. and R. Alrozi, *Optimization of preparation conditions for mangosteen peel-based activated carbons for the removal of Remazol*

- Brilliant Blue R* using response surface methodology. *Chemical Engineering Journal*, 2010. **165**(3): p. 883-890.
25. Williams, P.T. and A.R. Reed, *Development of activated carbon pore structure via physical and chemical activation of biomass fibre waste*. *Biomass and Bioenergy*, 2006. **30**(2): p. 144-152.
 26. Martínez de Yuso, A., et al., *Toluene and n-hexane adsorption and recovery behavior on activated carbons derived from almond shell wastes*. *Fuel Processing Technology*, 2013. **110**: p. 1-7.
 27. Tay, T., S. Ucar, and S. Karagöz, *Preparation and characterization of activated carbon from waste biomass*. *Journal of Hazardous Materials*, 2009. **165**(1-3): p. 481-485.
 28. Maroto-Valer, M.M., et al., *Effect of porous structure and surface functionality on the mercury capacity of a fly ash carbon and its activated sample*. *Fuel*, 2005. **84**(1): p. 105-108.
 29. Jain, A., R. Balasubramanian, and M.P. Srinivasan, *Production of high surface area mesoporous activated carbons from waste biomass using hydrogen peroxide-mediated hydrothermal treatment for adsorption applications*. *Chemical Engineering Journal*, 2015. **273**(0): p. 622-629.
 30. Acevedo, B., et al., *Properties and performance of mesoporous activated carbons from scrap tyres, bituminous wastes and coal*. *Fuel*, 2015. **151**(0): p. 83-90.
 31. Lillo-Ródenas, M.A., D. Cazorla-Amorós, and A. Linares-Solano, *Understanding chemical reactions between carbons and NaOH and KOH: An insight into the chemical activation mechanism*. *Carbon*, 2003. **41**(2): p. 267-275.
 32. Salman, J.M. and B.H. Hameed, *Effect of preparation conditions of oil palm fronds activated carbon on adsorption of bentazon from aqueous solutions*. *Journal of Hazardous Materials*, 2010. **175**(1-3): p. 133-137.
 33. Otowa, T., Y. Nojima, and T. Miyazaki, *Development of KOH activated high surface area carbon and its application to drinking water purification*. *Carbon*, 1997. **35**(9): p. 1315-1319.

34. Musa, A., et al., *Effect of shaking velocity on mono-glycosyl-stevioside productivity via alternansucrase acceptor reaction*. Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic, 2015. **116**: p. 106-112.
35. Hameed, B. and F. Daud, *Adsorption studies of basic dye on activated carbon derived from agricultural waste: Hevea brasiliensis seed coat*. Chemical Engineering Journal, 2008. **139**(1): p. 48-55.
36. Vasconcelos, H.L., et al., *Chitosan crosslinked with a metal complexing agent: Synthesis, characterization and copper(II) ions adsorption*. Reactive and Functional Polymers, 2008. **68**(2): p. 572-579.
37. He, Z.H., et al., *Development of Novel Type of Two-stage Adsorption Chiller with Different Adsorbents*. Energy Procedia, 2014. **61**(0): p. 1996-1999.
38. Vázquez, G., et al., *Adsorption of phenol on formaldehyde-pretreated Pinus pinaster bark: Equilibrium and kinetics*. Bioresource Technology, 2007. **98**(8): p. 1535-1540.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์องค์ประกอบของถ่านกัมมันต์แบบประมาณ

ก.1 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น (Moisture) (ASTM D 3173-95) มีรายละเอียดการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

1. อุณหภูมิให้ร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส
2. ปล่อยให้วอร์มพร้อมฝาที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น
3. ชั่งถ่านกัมมันต์หนักประมาณ 1.0 กรัม ใส่ในถ้วยกระเบื้อง
4. อบสารจนกระทั่งน้ำหนักคงที่ และคำนวณปริมาณความชื้นในถ่านกัมมันต์ตัวอย่าง

วิธีการคำนวณ

$$\text{ร้อยละความชื้น} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ}} \times 100 \quad (\text{ก.1})$$

ก.2 การวิเคราะห์ปริมาณสารระเหย (Volatile matter) (ASTM D 3175-95) มีรายละเอียดการวิเคราะห์ ดังต่อไปนี้

1. เฝากล้วยกระเบื้องพร้อมฝาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น
2. บรรจุถ่านกัมมันต์หนักประมาณ 1.0 กรัม ในถ้วยกระเบื้องผ่านการหา
3. เฝาถ่านกัมมันต์ตัวอย่างที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที (ขณะเผาให้ปิดฝากล้วยกระเบื้อง) ตั้งทิ้งไว้ในสภาพบรรยากาศประมาณ 20 นาที แล้วนำไปตั้งทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น
4. บันทึกน้ำหนักตัวอย่างหลังเผา

วิธีการคำนวณ

$$\text{ร้อยละสารระเหย} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังเผา}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา}} \times 100 \quad (\text{ก.2})$$

ก.3 การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า (Ash) (ASTM D 3174-95) มีรายละเอียดการวิเคราะห์ ดังต่อไปนี้

1. เผาด้วยกระบี่พร้อมฝาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น
2. บรรจุถ่านกัมมันต์ตัวอย่างหนักประมาณ 1.0 กรัม ใส่ในถ้วยกระบี่
3. เผาถ่านกัมมันต์ตัวอย่างที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ (เปิดฝาด้วยกระบี่ขณะเผา) คำนวณปริมาณเถ้าในถ่านกัมมันต์ตัวอย่าง

วิธีการคำนวณ

$$\text{ร้อยละเถ้า} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างหลังเผา}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา}} \times 100 \quad (\text{ก.3})$$

ก.4 การวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) มีรายละเอียดการวิเคราะห์ ดังต่อไปนี้

วิธีการคำนวณ

$$\begin{aligned} & \text{ร้อยละปริมาณคาร์บอนคงตัว} \\ & = 100 - (\text{ร้อยละความชื้น} + \text{ร้อยละเถ้า} + \text{ร้อยละสารระเหย}) \end{aligned} \quad (\text{ก.4})$$

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์

การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ตามวิธี Boehm titration ต้องใช้สารละลายทั้งหมด 4 ชนิด (Tessmer และคณะ 1977; Chen และคณะ, 2002) คือ

1. NaOH ความเข้มข้น 0.05 และ 0.25 นอร์มัล
2. Na₂CO₃ ความเข้มข้น 0.05 นอร์มัล
3. NaHCO₃ ความเข้มข้น 0.05 นอร์มัล
4. H₂SO₄ ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล

วิธีวิเคราะห์

1. ชั่งถ่านกัมมันต์น้ำหนัก 0.2 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ที่มีจุกปิดทั้งหมด 4 ขวด
2. เติมสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 0.05 และ 0.25 นอร์มัล สารละลาย Na₂CO₃ และ NaHCO₃ ความเข้มข้น 0.05 นอร์มัล ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในแต่ละขวด
3. นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่อัตราเร็ว 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 วัน
4. กรองสารละลายด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 แล้วดูดสารละลายที่ได้ปริมาตร 20 มิลลิลิตร บรรจุลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
5. ทำการไทเทรตสารละลายที่ได้ด้วย H₂SO₄ ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล บันทึกปริมาตรที่ใช้โดยอินดิเคเตอร์ที่ใช้ในการไทเทรตสารละลายแต่ละชนิดมีดังนี้ NaOH ใช้โบรโมไทมอลบลู(Bromothymol blue) Na₂CO₃ ใช้ฟีนอล์ฟทาลีน (Phenolphthalein) และ NaHCO₃ ใช้เมทิลออเรนจ์ (Methyl orange)

วิธีการคำนวณปริมาณหมู่ฟังก์ชัน

1. ปริมาณหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl group) คำนวณจากปริมาณการใช้ H₂SO₄ ของ NaHCO₃ ความเข้มข้น 0.05 นอร์มัล
2. ปริมาณหมู่แลคโตน (Lactone group) คำนวณจากผลต่างของปริมาณการใช้ H₂SO₄ ของ Na₂CO₃ ความเข้มข้น 0.05 นอร์มัล และ NaHCO₃ ความเข้มข้น 0.05 นอร์มัล
3. ปริมาณหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) คำนวณจากผลต่างของปริมาณการใช้ H₂SO₄ ของ NaOH ความเข้มข้น 0.05 นอร์มัล และ Na₂CO₃ ความเข้มข้น 0.05 นอร์มัล

4. ปริมาณหมู่คาร์บอนิล (Carboxyl group) คำนวณจากผลต่างของปริมาณการใช้ H_2SO_4 ของ NaOH ความเข้มข้น 0.25 นอร์มัล และ 0.05 นอร์มัล

ตารางที่ ข.1 ตัวอย่างการคำนวณปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์	(ก) 0.05 N NaOH	(ข) 0.25 N NaOH	(ค) 0.05 N Na_2CO_3	(ง) 0.05 N $NaHCO_3$
(1) น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)	0.2035	0.2007	0.2004	0.2021
(2) ปริมาตรสารละลาย (มิลลิลิตร)	20	20	20	20
(3) ปริมาตร 0.1 N H_2SO_4 (มิลลิลิตร)	6.9	38.5	4	8.9
(4) Blank	9.1	50	5.65	10.4
(5) = (4) - (3)	2.2	11.5	1.65	1.5
(6) = [(5) × 0.1]/20	0.011	0.0575	0.00825	0.0075
(7) = [(6) × 50]/(1)	2.7027	14.3249	2.0583	1.8555

จากตารางเมื่อนำมาคำนวณปริมาณหมู่ฟังก์ชันแต่ละชนิดจะได้ดังนี้

- ปริมาณหมู่คาร์บอกซิล เท่ากับ (ง) หรือเท่ากับ 1.8555 มิลลิอิกวิวาเลนต์ต่อกรัม
- ปริมาณหมู่แลกโตน เท่ากับ (ค) - (ง) หรือเท่ากับ $2.0583 - 1.8555 = 0.2028$ มิลลิอิกวิวาเลนต์ต่อกรัม
- ปริมาณหมู่ไฮดรอกซิล เท่ากับ (ก) - (ค) หรือเท่ากับ $2.7027 - 2.0583 = 0.6443$ มิลลิอิกวิวาเลนต์ต่อกรัม
- ปริมาณหมู่คาร์บอนิล เท่ากับ (ข) - (ก) หรือเท่ากับ $14.3249 - 2.7027 = 11.6222$ มิลลิอิกวิวาเลนต์ต่อกรัม

ภาคผนวก ค
การวิเคราะห์สมบัติของไบโอดีเซล

ค.1 การวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์

สารเคมี

1. สารละลายเฮกเซน
2. สารมาตรฐานเมทิลเฮปตะเดคะโนเอต (Methylheptadecanoate)

วิธีการวิเคราะห์

1. ชั่งไบโอดีเซลปริมาณ 0.2 กรัมใส่ลงในไวเอล พร้อมทั้งบันทึกน้ำหนักที่ชั่งได้
2. ชั่งสารมาตรฐานเมทิลเฮปตะเดคะโนเอตปริมาณ 0.2 กรัมใส่ลงในไวเอล พร้อมทั้งบันทึกน้ำหนักที่ชั่งได้ พร้อมทั้งบันทึกน้ำหนักที่ชั่งได้
3. เติมสารละลายเฮปเทนลงไปจนได้ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตรใส่ลงในไวเอล
4. นำตัวอย่างไปวิเคราะห์กับเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ผลที่ได้จะออกมาในรูปของกราฟ จากนั้นคำนวณหาปริมาณเมทิลเอสเทอร์จากการคำนวณพื้นที่ใต้กราฟที่ได้มา ดังสมการ

วิธีการคำนวณ

$$C = \frac{((\Sigma A - A_{EI} - A_H) \times M_{17} \times 100)}{(A_{EI} \times M_S)} \quad (\text{ค.1})$$

โดยที่ C = ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

ΣA = พื้นที่พีคทั้งหมด

A_{EI} = พื้นที่พีคของสารละลายเมทิลเฮปตะเดคะโนเอต

A_H = พื้นที่พีคของสารละลายเฮปเทน

M_{17} = น้ำหนักของสารละลายเมทิลเฮปตะเดคะโนเอต (มิลลิกรัม)

M_S = น้ำหนักของไบโอดีเซล (มิลลิกรัม)

ค.2 การวิเคราะห์ปริมาณกลีเซอรอล

เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณกลีเซอรอลในไบโอดีเซล คือ เครื่องไฮเปอร์ฟอร์แมนซ์ลิควิดโครมาโตกราฟี ภาวะในการวิเคราะห์มี ดังนี้

ดีเทคเตอร์ : RID-10A

เฟสคงที่ : Pinnacle II C18 column (240x4.6 มิลลิเมตร)

เฟสเคลื่อนที่ : 98: 2 (ปริมาตร/ปริมาตร) ของ 5 มิลลิโมลของกรดซัลฟูริกกับเมทานอล

อัตราการไหล : 0.5 มิลลิเมตรต่อนาที

อุณหภูมิของคอลัมน์ : 40 องศาเซลเซียส

ค.3 การวิเคราะห์ปริมาณสบู่

สารเคมี

1. สารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.01 นอร์มัล
2. สารละลายไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์
3. โบโมฟินอลบูลู

วิธีการวิเคราะห์

1. ชั่งไบโอดีเซลปริมาณ 10 มิลลิเมตรผสมกับสารละลายไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ปริมาณ 100 มิลลิเมตร ใส่ในขวดรูปชมพู่
2. หยดโบโมฟินอลบูลูประมาณ 15-20 หยด ใส่ลงในข้อ 2.1 จนกระทั่งได้สารละลายสีฟ้าอ่อน
3. นำสารละลายที่ได้ในข้อ 2.2 ไปไทเทรตกับสารละลายกรดไฮโดรคลอริก จนสารละลายเปลี่ยนเป็นสีเหลืองอ่อน

วิธีการคำนวณ

$$\text{ปริมาณสบู่} = \frac{\text{ปริมาตรไฮโดรคลอริก (มิลลิเมตร)}}{\text{ปริมาตรของไบโอดีเซล (มิลลิเมตร)}} \times 30.44 \quad (\text{ค.2})$$

ค.4 การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดและปริมาณกรดไขมันอิสระ

สารเคมี

1. สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล
2. สารละลายผสมโพรพานอลกับโทลูอินอัตราส่วน 1 ต่อ 1
4. สารละลายฟีนอล์ฟทาลีน

วิธีการวิเคราะห์

1. ชั่งน้ำมันตัวอย่างปริมาณ 2.5 กรัมใส่ในขวดรูปชมพู่ พร้อมทั้งบันทึกน้ำหนัก
2. เติมสารผสมโพรพานอลกับโทลูอินปริมาณ 125 มิลลิลิตร พร้อมทั้งเขย่าให้ไบโอดีเซลละลายเข้ากัน
3. เติมสารละลายฟีนอล์ฟทาลีนปริมาณ 2 มิลลิลิตร
4. ไทเทรทด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จนสารละลายเปลี่ยนเป็นสีชมพูอ่อน และคงตัวอยู่ 30 วินาที บันทึกปริมาตรสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้

วิธีการคำนวณ

$$AV = \frac{56.1 \times N \times V}{m} \quad (\text{ค.3})$$

โดย AV = ค่าความเป็นกรด (มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์/กรัมน้ำมัน)

N = ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (นอร์มอล)

V = ปริมาตรของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไทเทรท (มิลลิลิตร)

M = น้ำหนักของไบโอดีเซล (กรัม)

$$\%FFA = \frac{AV}{2.19} \quad (\text{ค.4})$$

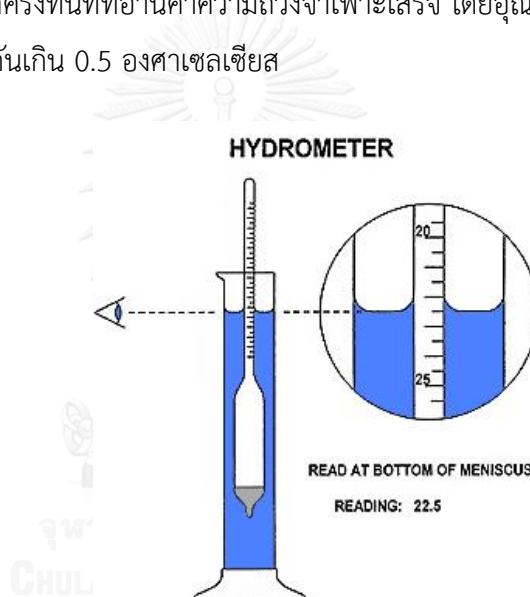
โดย FFA = ปริมาณกรดไขมันอิสระ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

AV = ค่าความเป็นกรด (มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์/กรัมน้ำมัน)

ค.5 การวิเคราะห์ความหนาแน่น

วิธีการวิเคราะห์

1. เทน้ำมันลงไปปริมาณ 3 ส่วน 4 ของกระบอกตวง แฉ่งลงในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 15 องศาเซลเซียส
2. เลือกไฮโดรมิเตอร์ที่เหมาะสม ค่อยๆ หย่อนลงในกระบอกตวงแล้วปล่อยให้ลอยตัวอยู่นิ่ง โดยอิสระกับผนังของกระบอกตวง
3. อ่านค่าความถ่วงเอ พี ไอ ที่ขีดระดับของไฮโดรมิเตอร์ซึ่งตรงกับระดับของน้ำมัน (ผิวโค้งล่าง) โดยให้สายตาอยู่ในระดับเดียวกันกับระดับน้ำมัน แล้วบันทึกค่าที่อ่านได้
4. อ่านค่าที่ได้อีกครั้งทันทีที่อ่านค่าความถ่วงจำเพาะเสร็จ โดยอุณหภูมิที่อ่านได้ในครั้งนี้ไม่ควรแตกต่างกันเกิน 0.5 องศาเซลเซียส



ภาพที่ ค.1 การอ่านค่าไฮโดรมิเตอร์เมื่อใช้น้ำมันที่โปร่งแสง

วิธีการคำนวณ

$$sp. gr. = \frac{141.5}{^{\circ}API + 131.5} \quad (ค.5)$$

โดย $sp.gr.$ = ความถ่วงจำเพาะ

$^{\circ}API$ = ความถ่วงเอ พี ไอ

$$\rho = \frac{sp.gr. of oil}{sp.gr. of water} \quad (ค.6)$$

โดย $sp.gr.of\ oil =$ ความถ่วงจำเพาะของน้ำมัน
 $sp.gr.of\ water =$ ความถ่วงจำเพาะของน้ำ

ค.6 การวิเคราะห์ค่าความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

วิธีการวิเคราะห์

1. เลือก Viscometer ที่แห้งและสะอาด ตามชนิดและขนาดที่เหมาะสมกับงานที่ใช้ คือ ตัวอย่างที่มีความหนืดมากๆ ควรจะเลือก Viscometer ที่มี capillary กว้าง ส่วนน้ำมันที่มีความหนืดต่ำๆ ควรจะเลือก Viscometer ที่มี capillary แคบ โดยเวลาที่ใช้จากการเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งถึงจุดที่สองไม่ควรต่ำกว่า 200 วินาที
2. นำน้ำมันใส่ใน Viscometer ตามวิธีที่กำหนดโดยผู้ออกแบบเครื่องมือ โดยทั่วไปใช้วิธีคว่ำ Viscometer ให้ทางด้านที่ไม่มีจุดจับเวลาลงในน้ำมันตัวอย่างแล้วดูอีกทางหนึ่งจนได้ปริมาณน้ำมันตามที่ Viscometer นั้นๆ กำหนด
3. นำ Viscometer ที่ได้ไปแขวนใน Viscometer Bath ที่ตั้งอุณหภูมิไว้แล้วและทิ้งไว้จนมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิของ Bath ซึ่งปกติใช้เวลา 30 วินาที
4. ดูดน้ำมันให้อยู่สูงกว่าจุดจับเวลาจุดแรกประมาณ 5 มิลลิลิตร ปล่อยให้ น้ำมันไหลโดยอิสระ เริ่มจับเวลาเมื่อระดับของน้ำมันไหลถึงจุดจับเวลาจุดแรก และหยุดหนึ่งเมื่อถึงจุดจับเวลาจุดที่สอง บันทึกเวลาที่ได้เป็นวินาที

วิธีการคำนวณ

$$V = C \times t \quad (\text{ค.7})$$

โดย $V =$ ความหนืด
 $C =$ ค่าคงที่ของ Viscometer
 $t =$ เวลาที่ได้จากการจับเวลา

ค.7 การวิเคราะห์จุดวาบไฟ

วิธีการวิเคราะห์

1. จุดไฟที่เปลวไฟทดสอบและปรับให้เปลวไฟมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3.2-4.8 มิลลิลิตร

2. ให้ความร้อนกับตัวอย่างในระยะแรกให้มีอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิเป็น 14-15 องศาเซลเซียสต่อนาที และเมื่อตัวอย่างมีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดวาบไฟที่คาดไว้ประมาณ 60 องศาเซลเซียส ให้ลดความร้อนลงเพื่อให้อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิลดลงเพื่อให้อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิลดลงเป็น 5-6 องศาเซลเซียสต่อนาที จนกระทั่งตัวอย่างมีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดวาบไฟประมาณ 30 องศาเซลเซียส
3. เมื่อตัวอย่างมีอุณหภูมิต่ำกว่า 30 องศาเซลเซียสแล้ว เริ่มต้นใช้เปลวไฟเคลื่อนผ่านถ้วยทดสอบ และให้เปลวไฟผ่านทุกครั้งที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 2 องศาเซลเซียส
4. เมื่อเกิดไฟวาบขึ้นที่จุดใดจุดหนึ่งบนผิวหน้าของตัวอย่าง อ่านอุณหภูมิจากเทอร์โมมิเตอร์ แล้วบันทึกเป็นจุดวาบไฟ



ภาคผนวก ง
การวิเคราะห์ค่าไอโอดีนของถ่านกัมมันต์

ความสามารถในการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ตามวิธี ASTM D 4607-94 มีรายละเอียดการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้ _

ง.1 การเตรียมสารละลาย

1. สารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เตรียมโดยตวงกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นปริมาตร 70 มิลลิลิตร เติมนลงในน้ำกลั่นที่มีปริมาตร 550 มิลลิลิตร
2. น้ำแข็งความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เตรียมโดยชั่งน้ำแข็งปริมาณ 1 กรัม ละลายด้วยน้ำร้อนจนมีปริมาตรเป็น 10 กรัม โดยน้ำแข็งที่เตรียมได้จะใช้น้ำในวันเตรียมเท่านั้น
3. สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตความเข้มข้น 0.100 . 0.001 นอร์มัล เตรียมโดยชั่งโซเดียมไทโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) ปริมาตร 24.820 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 75 มิลลิลิตร เติมโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ปริมาตร 0.1 กรัม แล้วปรับให้สารละลายมีปริมาตร 1,000 มิลลิลิตรด้วยขวดปรับปริมาตร
4. สารละลายไอโอดีนความเข้มข้น 0.100 ± 0.001 นอร์มัล เตรียมโดยชั่งไอโอดีน (I_2) ปริมาตร 12.700 กรัม และโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) ปริมาตร 19.10 กรัม ผสมเข้าด้วยกันแล้วละลายในน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้อย่างน้อย 4 ชั่วโมงจนผลึกไอโอดีนละลายหมด แล้วเติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ด้วยขวดปรับปริมาตร
5. สารละลายโพแทสเซียมไอโอเดตความเข้มข้น 0.100 นอร์มัล เตรียมโดยอบโพแทสเซียมไอโอเดตให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทำให้เย็นในหม้อดูดความชื้นแล้วชั่งปริมาณ 3.5667 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นโดยปรับให้มีปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร

ง.2 การเทียบมาตรฐานสารละลาย

1. สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต
 - ปิเปตสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดตปริมาณ 25 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมโพแทสเซียมไอโอไดด์ปริมาณ 2 กรัมเขย่าให้ละลาย แล้วเติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นปริมาณ 5 มิลลิลิตร

- ไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต โดยใช้น้ำแบ่งเป็นอินดิเคเตอร์ จุดยุติ คือ จุดที่สารละลายใสไม่มีสี
- คำนวณความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตจาก

$$N_1 = \frac{(PxR)}{S} \quad (ง.1)$$

โดย N_1 คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (นอร์มัล)

P คือ ปริมาตรของสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต (มิลลิลิตร)

R คือ ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไทโอซัลเฟต (นอร์มัล)

S คือ ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ไทเทรต (มิลลิลิตร)

2. สารละลายไอโอดีน

- ปิเปตสารละลายไอโอดีนปริมาณ 25 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
- ไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต โดยใช้น้ำแบ่งเป็นอินดิเคเตอร์ จุดยุติ คือ จุดที่สารละลายใสไม่มีสี
- คำนวณความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตจาก

$$N_2 = \frac{(SxN_1)}{I} \quad (ง.2)$$

โดย N_2 คือ ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน (นอร์มัล)

N_1 คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (นอร์มัล)

I คือ ปริมาตรของสารละลายไอโอดีน (มิลลิลิตร)

S คือ ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ไทเทรต (มิลลิลิตร)

ง.3. การวิเคราะห์ค่าไอโอดีน

1. บดและคัดขนาดตัวอย่างให้มีขนาดน้อยกว่า 250 ไมโครเมตร
2. อบตัวอย่างให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 ถึง 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง รอให้เย็นในหม้อดูดความชื้น
3. ชั่งและบันทึกน้ำหนักตัวอย่างเท่ากับ M ให้มีความละเอียดของทศนิยม 4 ตำแหน่ง ในขวดชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ที่มีจุกปิด

*** หมายเหตุ ต้องชั่งน้ำหนักตัวอย่าง 3 ค่าต่อตัวอย่าง เพื่อให้ได้ค่า C มีค่าประมาณ 0.01 0.02 และ 0.03 โดยการประมาณน้ำหนักตัวอย่างแสดงดังตารางที่ ง.1

4. เติมสารละลายไฮโดรคลอริกความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักปริมาณ 10 มิลลิลิตร แกว่งขวดเพื่อให้ถ่านกัมมันต์ชุ่มด้วยสารละลายกรด แล้วนำไปต้มให้เดือดประมาณ 30 วินาที เพื่อกำจัดเถ้าหรือกำมะถันออกจากผิวของถ่านกัมมันต์

5. เติมสารละลายไอโอดีนที่เตรียมได้ปริมาณ 100 มิลลิลิตร ปิดจุกแล้วเขย่าแรงๆ เป็นเวลา 30 วินาที

6. กรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 2 โดยสารละลายที่ได้ปริมาณ 20 มิลลิลิตร นำมาล้างขวดและปิเปตที่ใช้

7. ตูตสารละลายที่กรองได้ 50 แล้วไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่เตรียมได้ โดยใช้น้ำแป้งเป็นอินดิเคเตอร์ จุดยุติ คือ สารละลายใสไม่มีสี บันทึกปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้เป็นมิลลิลิตร

8. คำนวณค่าการดูดซับจำเพาะ (X/M) และความเข้มข้นที่สมมูลของสารละลายไอโอดีน (C) ได้จาก

$$\frac{X}{M} = \frac{A - (DF \times B \times S)}{M} \quad (ง.3)$$

โดย X/M คือ ปริมาณที่ไอโอดีนถูกดูดซับโดยถ่านกัมมันต์ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

A คือ $N_2 \cdot 12693.0$

B คือ $N_1 \cdot 126.93$

M คือ ปริมาณของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ (กรัม)

DF คือ $\frac{I+H}{F}$ I คือ ปริมาณสารละลายไอโอดีน (มิลลิลิตร)

H คือ ปริมาณกรดไฮโดรคลอริก (มิลลิลิตร)

F คือ ปริมาณของสารที่นำมาไทเทรต (มิลลิลิตร)

$$C = \frac{N_1 \times S}{F} \quad (ง.4)$$

โดย C คือ ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนที่เหลือ (นอร์มัล)

9. นำค่า X/M ที่ได้ทั้งสามค่ามาสร้างกราฟระหว่าง $\log C$ (แกน x) และ $\log (X/M)$ (แกน y) จะได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง

10. จากความสัมพันธ์เส้นตรงที่ได้ที่ตำแหน่ง $\log C = -1.699$ หรือ $C = 0.02$ จะทราบค่าบนแกน y นำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าไอโอดีน (IA) ได้ดังนี้

$$IA = 10^y \quad (ง.5)$$

ตารางที่ ง.1 การประมาณน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ที่ใช้วิเคราะห์ค่าไอโอดีน

M				M			
IA	C=0.01	C=0.02	C=0.03	IA	C=0.01	C=0.02	C=0.03
300	3.766	3.300	2.835	1550	0.729	0.639	0.549
350	3.228	2.829	2.430	1600	0.706	0.619	0.531
400	2.824	2.475	2.126	1650	0.684	0.600	0.515
450	2.510	2.200	1.890	1700	0.664	0.582	0.500
500	2.259	1.980	1.701	1750	0.645	0.556	0.486
550	2.054	1.800	1.546	1800	0.628	0.550	0.472
600	1.883	1.650	1.417	1850	0.610	0.535	0.460
650	1.738	1.523	1.306	1900	0.591	0.521	0.447
700	1.614	1.414	1.215	1950	0.579	0.508	0.436
750	1.506	1.320	1.134	2000	0.565	0.495	0.425
800	1.412	1.237	1.063	2050	0.551	0.483	0.415
850	1.329	1.164	1.000	2100	0.538	0.471	0.405
900	1.255	1.100	0.945	2150	0.525	0.460	0.396
950	1.189	1.042	0.896	2200	0.513	0.450	0.386
1000	1.130	0.990	0.850	2250	0.502	0.440	0.378
1050	1.076	0.943	0.810	2300	0.491	0.430	0.370
1100	1.027	0.900	0.773	2350	0.481	0.421	0.362
1150	0.982	0.861	0.739	2400	0.471	0.412	0.354
1200	0.941	0.825	0.709	2450	0.461	0.404	0.347
1250	0.904	0.792	0.680	2500	0.452	0.396	0.340
1300	0.869	0.761	0.654	2550	0.443	0.388	0.333
1350	0.837	0.733	0.630	2600	0.434	0.381	0.327
1400	0.807	0.707	0.607	2650	0.426	0.374	0.321
1450	0.779	0.683	0.586	2700	0.418	0.367	0.315
1500	0.753	0.660	0.567	2750	0.411	0.350	0.309

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาววิไลวรรณ แผงสุภา เกิดวันที่ 8 สิงหาคม พ.ศ. 2531 ที่จังหวัดนครสวรรค์ สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีการศึกษา 2553 และเข้าศึกษา ต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะ วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2555 และสำเร็จหลักสูตรในเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2558

