

การดัดแปรถ่านชีวภาพซังข้าวโพดสำหรับการลดกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์ม
MODIFICATION OF CORN COBS BIOCHAR FOR REDUCING
PALMITIC OIL



ศศิประภา แก้วแดง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาพลังงานและสิ่งแวดล้อมชุมชน
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่

พ.ศ. 2567

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การคัดแปรถ่านชีวภาพซังข้าวโพด สำหรับการลดกรดปาล์มมิติก
ในน้ำมันปาล์ม

ผู้วิจัย

ศศิประภา แก้วแดง

สาขาวิชา

พลังงานและสิ่งแวดล้อมชุมชน

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.หทัยทิพย์ สิ้นธูยา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

อาจารย์ ดร.วิงค์ กังวานสุขุมงคล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรชัย ธีรัฐ จันทร์ศรี

คณะกรรมการสอบ

.....
(อาจารย์ ดร.นวงส์ ชลคุป) ประธานกรรมการ

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.บุญญาวัฒน์ อยู่สุข)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.หทัยทิพย์ สิ้นธูยา)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.วิงค์ กังวานสุขุมงคล)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรชัย ธีรัฐ จันทร์ศรี)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาพลังงานและสิ่งแวดล้อมชุมชน

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติศักดิ์ โชติกเดชาณรงค์)

วันที่ 29 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2567

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่

หัวข้อวิทยานิพนธ์ : การคัดแปรถ่านชีวภาพซังข้าวโพด
สำหรับการลดกรดปาล์มมิดิกในน้ำมันปาล์ม

ผู้วิจัย : ศศิประภา แก้วแดง

สาขาวิชา : พลังงานและสิ่งแวดล้อมชุมชน

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. หทัยทิพย์ สิ้นธูยา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

: อาจารย์ ดร. วียงค์ กังวานศุภมงคล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรชัย ธรรมรัฐ จันทร์ศรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการผลิตถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด และคัดแปรด้วยสารเคมี เพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับกรดปาล์มมิดิกในน้ำมันปาล์มเพิ่มขึ้น โดยใช้กระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส (CCB) และถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่คัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) พบว่าถ่านชีวภาพที่คัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่ความเข้มข้น 4 โมลาร์ และถ่านชีวภาพที่คัดแปรด้วยกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) ที่ความเข้มข้น 2 โมลาร์ นั้นมีค่าการดูดซับไอดีนสูงสุดที่ 740.31 และ 659.11 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ มีพื้นที่ผิว 61.35 และ 31.47 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด (CCB) และผลการศึกษาด้วยเทคนิค FTIR ยืนยันได้ว่าที่พื้นผิวของถ่านคัดแปรมีการเปลี่ยนแปลงของกลุ่มฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านซึ่งสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับสารเคมีที่มีขั้ว และมีแนวโน้มที่จะสามารถดูดซับกรดปาล์มมิดิกในน้ำมันปาล์มได้ การคัดแปรนี้ยังสามารถเพิ่มพื้นที่ผิวและรูพรุนทำให้วัสดุมีศักยภาพในการดูดซับที่ดีขึ้น ในส่วนที่สองได้มีการนำถ่านชีวภาพที่ได้จากการศึกษามาทำการทดสอบดูดซับกรดปาล์มมิดิกในน้ำมันปาล์ม โดยปัจจัยที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ เวลาในการดูดซับ ปริมาณของถ่าน อุณหภูมิ ความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้ในการคัดแปรถ่านชีวภาพ การนำถ่านกลับมาใช้ซ้ำ และการนำไปทดสอบกับน้ำมันพืชใช้แล้ว พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับคือ ปริมาณกรดไขมันอิสระเริ่มต้นร้อยละ 5 โดยใช้เวลาในการดูดซับ 240 นาที ปริมาณถ่านชีวภาพที่คัดแปรด้วย

โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เข้มข้น 4 โมลาร์ อัตราการกวน 600 รอบต่อนาที จะมีความสามารถในการดูดซับสูงถึง 284.80 มิลลิกรัมต่อกรัม และถ่านชีวภาพที่ดัดแปรด้วยกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) มีความสามารถในการดูดซับกรดไขมันสูงสุดที่ 21.12 มิลลิกรัมต่อกรัม กรดไขมันอิสระหลังการดูดซับเหลือร้อยละ 0.94 และ 4.69 ตามลำดับ และเมื่อนำถ่านชีวภาพกลับมาใช้ซ้ำพบว่าถ่านชีวภาพที่ดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ถึง 3 ครั้ง ที่ทำให้น้ำมันมีกรดไขมันอิสระเป็นไปตามเงื่อนไขของน้ำมันสารตั้งต้นของการผลิตไบโอดีเซล ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับด้วยถ่านดัดแปรมีความสอดคล้องกับสมการจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม ซึ่งเป็นการดูดซับที่เป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าและเป็นการดูดซับทางเคมี ส่วนผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับสามารถอธิบายด้วยไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช ซึ่งการดูดซับที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน สามารถเกิดการดูดซับได้หลายชั้น และผลการศึกษาอุณหพลศาสตร์มีสามารถเกิดขึ้นได้เองโดยธรรมชาติ (ΔG) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (ΔH) เกิดการดูดซับบริเวณรอยต่อระหว่างของเหลว และของแข็ง (ΔS) โดยมีการจัดเรียงโมเลกุลบนพื้นผิวถ่านดูดซับอย่างเป็นระเบียบ นอกจากนี้การทดสอบการดูดซับกับน้ำมันพืชใช้แล้ว ณ เงื่อนไขการทดลองเดิม จากการทดลองพบว่าถ่านชีวภาพที่ดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) มีประสิทธิภาพการดูดซับร้อยละ 50.32 และค่าความสามารถในการดูดซับ 58.50 มิลลิกรัมต่อกรัม จากงานวิจัยนี้สามารถแสดงให้เห็นถึงแนวทางในการเตรียมวัสดุตัวดูดซับกรดไขมันในน้ำมันปาล์มที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

คำสำคัญ: ถ่านชีวภาพ, ชั่งข้าวโพด, การดูดซับ, กรดไขมันอิสระ, ไอโซเทอร์มการดูดซับ, จลนพลศาสตร์การดูดซับ, อุณหพลศาสตร์การดูดซับ

The Title : Modification of Corn Cob Biochar for Reducing Palmitic Oil

The Author : Sasiprapha Kaewdang

Program : Community Energy and Environment

Thesis Advisors

: Assistant Professor. Dr. Hathaithip Sintuya Advisor

: Dr. Wiyong Kangwansupamonkon Co – advisor

: Assistant Professor. Dr. Surachai Narrat Jansri Co – advisor



ABSTRACT

This research focuses on producing biochar from corn cob biomass (CCB) and chemically modifying it to enhance its ability to adsorb palmitic acid in palm oil. Initially, biochar was prepared from CCB through pyrolysis at 500°C. Then, the obtained biochar was modified with potassium hydroxide (KOH) and phosphoric acid (H₃PO₄) at 4 and 2 Molar concentrations, respectively. The modified biochar demonstrated increased iodine adsorption values of 740.31 mg/g for CCB-KOH and 659.11 mg/g for CCB-H₃PO₄, with corresponding surface areas of 61.35 and 31.47 m²/g, respectively. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) analysis confirmed alterations in surface functional groups, enhancing the adsorption of polar chemicals and facilitating the adsorption of palmitic acid in palm oil. Subsequent tests on palm oil absorption using the modified biochars considered variables such as adsorption time, biochar quantity, temperature, and concentration of chemical agents used in the biochar modification. The study also evaluated the reuse potential of the biochar and its effectiveness with used vegetable oil. The adsorption kinetics and isotherms were consistent with second-order kinetics and Freundlich isotherm, indicating multi-layer, non-homogeneous adsorption. The results revealed that CCB-KOH exhibited excellent absorption efficiency 284.80 mg/g under optimal conditions and could be reused up to three times, maintaining its efficacy. In contrast, CCB-H₃PO₄ showed lower fatty acid adsorption capacity 21.12 mg/g. Furthermore, the testing of used vegetable oil with the modified biochar with KOH conditions exhibited 50.32% absorption efficiency and an adsorption capacity of 58.50 mg/g,

revealing the compatibility of modified biochar from agricultural waste-based materials for absorbing palmitic acid in palm oil.

Keywords : Biomass charcoal, corn cobs, adsorption, free fatty acids, adsorption isotherm, adsorption kinetics, adsorption thermodynamics



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่อง "การตัดแปรถ่านชีวภาพซังข้าวโพดสำหรับการลดกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์ม" เป็นผลงานที่เกิดจากความพยายามและความมุ่งมั่นของผู้วิจัยในการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ด้วยความรู้จากบุคคลหลายฝ่าย จึงขออนุญาติกราบขอบพระคุณดังนี้

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. หทัยทิพย์ สิ้นธยา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ดร. วิยงค์ กังวานสุขมงคล และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรัชชัย ฌรัฐ จันทรศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ในการให้คำแนะนำการวิจัยต่างๆ ตลอดจนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ดี และดร. กนิษฐา บุญภาวนิชกุล นักวิจัยศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สวทช. ได้ให้ความอนุเคราะห์การใช้เครื่องมือ รวมถึงขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์นาโนเทคโนโลยี ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือเอื้อเฟื้อเพื่อตลอดการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณวิทยาลัยพัฒนาเศรษฐกิจและเทคโนโลยีชุมชนแห่งเอเชียเป็นอย่างสูงที่ได้สนับสนุนการศึกษาของผู้วิจัยและให้ความอนุเคราะห์พื้นที่ในการทำงานวิจัยของผู้วิจัย ขอขอบคุณคณะผู้สอนและบุคลากรทุกระดับที่ได้มีบทบาทสำคัญในการส่งเสริมและพัฒนาทักษะของผู้วิจัยทั้งทางวิชาการและทักษะอื่นๆ

ขอกราบขอบพระคุณทุนการศึกษาจากโครงการทุนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (Thailand Graduate Institute of Science and Technology : TGIST) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) สัญญาเลขที่ SCA-CO-2561-7134TH และรหัสผู้รับทุน TG-22-10-61-001D ทุนการศึกษานี้ได้เสริมสร้างโอกาสในการศึกษาและวิจัย ทำให้ผู้วิจัยสามารถทำงานวิจัยนี้ได้เต็มที่

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม (สกสว.) : งบประมาณด้านวิจัยและนวัตกรรม ประเภท Fundamental Fund ปีงบประมาณ 2566 ภายใต้โครงการวิจัยการพัฒนาระบบดูดซับกรดไขมันอิสระด้วยถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ปรับสภาพด้วยโอโซนสำหรับน้ำมันพืชใช้แล้ว สัญญาเลขที่ สกสว. 30/66 ที่ช่วยสนับสนุนงบประมาณสำหรับทำวิจัยในครั้งนี้

หากงานวิจัยนี้มีข้อบกพร่อง ผิดพลาดอาจจะเกิดขึ้นนั้น ผู้วิจัยขออภัยผู้ที่เกี่ยวข้องและหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่เกี่ยวข้อง

ศศิประภา แก้วแดง

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อ | ค |
| ABSTRACT | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ช |
| สารบัญ | ซ |
| สารบัญตาราง | ญ |
| สารบัญภาพ..... | ฉ |
| บทที่ | |
| 1 บทนำ | 1 |
| ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา | 1 |
| วัตถุประสงค์ของการวิจัย | 5 |
| ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย | 5 |
| สมมติฐานการวิจัย..... | 5 |
| ขอบเขตของการวิจัย..... | 5 |
| นิยามศัพท์เฉพาะ | 7 |
| กรอบแนวคิดการวิจัย | 7 |
| 2 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง | 8 |
| ชีวมวล..... | 8 |
| ซังข้าวโพด | 10 |
| กระบวนการไพโรไลซิส | 11 |
| ถ่านชีวภาพ | 15 |
| การวิเคราะห์สมบัติของซังข้าวโพด และถ่านชีวภาพซังข้าวโพด | 19 |
| ลิพิด (ไขมันและน้ำมัน)..... | 22 |
| กระบวนการกำจัดกรดไขมันอิสระ (neutralizing)..... | 28 |

สารบัญ (ต่อ)

| บทที่ | หน้า |
|--|------------|
| 2 | |
| การวิเคราะห์ความเป็นกรดของไขมันและน้ำมัน..... | 29 |
| กระบวนการดูดซับ..... | 30 |
| เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 47 |
| 3 วิธีดำเนินการวิจัย | 56 |
| การเตรียมวัสดุคืบ..... | 56 |
| การดำเนินงานวิจัย..... | 57 |
| 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล และอภิปรายผล | 65 |
| การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของขังข้าวโพด และถ่านชีวภาพ ขังข้าวโพด..... | 66 |
| การดัดแปรสมบัติของถ่านชีวภาพด้วยสารเคมี..... | 70 |
| การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์มด้วยถ่าน ชีวภาพขังข้าวโพด..... | 76 |
| 5 สรุป และข้อเสนอแนะ | 96 |
| บรรณานุกรม | 100 |
| ภาคผนวก | 115 |
| ภาคผนวก ก การวิเคราะห์ค่าไอโอดีนนมเบอร์รี่..... | 116 |
| ภาคผนวก ข การวิเคราะห์กรดไขมันอิสระ..... | 120 |
| ประวัติผู้วิจัย | 121 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | | หน้า |
|----------|--|------|
| 4.1 | อักษรย่อ และความหมายที่ใช้ในงานวิจัย | 65 |
| 4.2 | ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของซังข้าวโพด และถ่านชีวภาพซังข้าวโพด..... | 68 |
| 4.3 | ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของซังข้าวโพด และถ่านชีวภาพซังข้าวโพด | 69 |
| 4.4 | ผลการดูดซับ ไอโอดีนของซังข้าวโพด ถ่านซังข้าวโพด ถ่านซังข้าวโพด ดัดแปรด้วยสารเคมี..... | 70 |
| 4.5 | ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของซังข้าวโพด ถ่านชีวภาพซังข้าวโพด ... | 73 |
| 4.6 | ผลการศึกษาเวลาในการดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์มด้วยถ่านชีวภาพ ซังข้าวโพด..... | 77 |
| 4.7 | ผลการศึกษาเวลาในการดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์มด้วยถ่านชีวภาพ ซังข้าวโพดดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์..... | 78 |
| 4.8 | ผลการศึกษาเวลาในการดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์มด้วยถ่านชีวภาพ ซังข้าวโพดดัดแปรด้วยกรดฟอสฟอริก..... | 78 |
| 4.9 | พารามิเตอร์ของสมการจลนพลศาสตร์ของการดูดซับกรดปาล์มมิติก ในน้ำมันปาล์มด้วยถ่านดูดซับ | 81 |
| 4.10 | ผลของปริมาณถ่านชีวภาพซังข้าวโพดในการดูดซับกรดปาล์มมิติก ในน้ำมันปาล์ม | 83 |
| 4.11 | ผลของปริมาณถ่านชีวภาพซังข้าวโพดดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ในการดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์ม | 83 |
| 4.12 | ผลของปริมาณถ่านชีวภาพซังข้าวโพดดัดแปรด้วยกรดฟอสฟอริกในการดูดซับ กรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์ม | 84 |
| 4.13 | พารามิเตอร์ของไอโซเทอร์มการดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์มแบบ Langmuir และแบบ Freundlich ด้วยถ่านดูดซับ..... | 86 |
| 4.14 | ผลการศึกษาอุณหภูมิของการดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์ม ด้วยถ่านดูดซับ | 88 |
| 4.15 | พารามิเตอร์ของสมการอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับกรดปาล์มมิติก ในน้ำมันปาล์มด้วยถ่านดูดซับ | 91 |

สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางที่ | | หน้า |
|----------|--|------|
| 4.16 | จำนวนการใช้ถ่านชีวภาพซ้า หลังงานการดูดซับด้วยถ่านชีวภาพซังข้าวโพด ดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์..... | 93 |
| 4.17 | ผลการเปรียบเทียบผลการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์ม | 95 |



สารบัญภาพ

| ภาพที่ | | หน้า |
|--------|--|------|
| 1.1 | กรอบแนวคิดการวิจัย | 7 |
| 2.1 | ส่วนประกอบของชีวมวล | 10 |
| 2.2 | การไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่ำ | 12 |
| 2.3 | การไพโรไลซิสของลิกนิน | 14 |
| 2.4 | โครงสร้างของกรดไขมัน | 23 |
| 2.5 | กลีเซอไรด์ และลิพิดต่าง ๆ | 25 |
| 2.6 | หมู่คาร์บอกซิล | 26 |
| 2.7 | การแยกสลายตัวด้วยน้ำของไตรกลีเซอไรด์ | 26 |
| 2.8 | การเกิดกรดไขมันอิสระ (free fatty acid) | 27 |
| 2.9 | แสดงการดูดซับแบบชั้นเดียว และการดูดซับแบบหลายชั้น | 32 |
| 2.10 | กลไกการดูดซับสารปนเปื้อนบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับที่มีรูพรุน | 33 |
| 2.11 | ไอโซเทอร์มของการดูดซับ | 38 |
| 2.12 | ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ | 40 |
| 2.13 | ไอโซเทอร์มการดูดซับฟรุนดลิช | 42 |
| 2.14 | ไอโซเทอร์มการดูดซับบีอีที | 44 |
| 3.1 | ซังข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ | 56 |
| 3.2 | น้ำมันที่ใช้ในงานวิจัย | 57 |
| 3.3 | การดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์ม ด้วยถ่านชีวภาพซังข้าวโพด | 62 |
| 4.1 | การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของซังข้าวโพด | 67 |
| 4.2 | ลักษณะพื้นผิวภายนอกของวัสดุดูดซับ | 74 |
| 4.3 | สเปกตรัมของซังข้าวโพด และถ่านซังข้าวโพดตัดแปร ด้วยเทคนิค FTIR | 75 |
| 4.4 | ผลของเวลาในการดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์มด้วยถ่านชีวภาพ ซังข้าวโพดตัดแปร และไม่ได้ตัดแปร | 79 |
| 4.5 | จลนพลศาสตร์ของการดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์ม | 82 |
| 4.6 | ผลของปริมาณผงถ่านในการดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์ม | 84 |
| 4.7 | ไอโซเทอร์มการดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์ม | 87 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ | หน้า |
|---|------|
| 4.8 อุณหพลศาสตร์การดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์ม..... | 92 |
| 4.9 ประสิทธิภาพในการดูดซับกรดไขมันอิสระ และค่าความสามารถ ในการดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์มจากการใช้ถ่านซ้่า..... | 93 |



บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันจังหวัดเชียงใหม่มีพื้นที่ทำการเกษตรประมาณ 2,032,556 ไร่ (สำนักงานจังหวัดเชียงใหม่, 2563) โดยมีข้าวโพดที่ถือได้ว่าเป็นพืชเศรษฐกิจมีการปลูกมากกว่า 270,000 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 75 ของพื้นที่เพาะปลูกทั้งจังหวัด และมีผลผลิตที่ป้อนเข้าสู่ตลาดประมาณ 197,000 ตัน คิดเป็นไร่ละ 730 กิโลกรัม (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2563) หลังการเก็บเกี่ยวข้าวโพดมีวัสดุเหลือทิ้งที่เหลือประมาณ 190,000 ตัน/ปี ประกอบไปด้วย ลำต้นข้าวโพด (ร้อยละ 43.52) เปลือกข้าวโพด (ร้อยละ 38.48) และซังข้าวโพด (ร้อยละ 18) (จุฬา สิ้นไพบูลย์, 2564) เมื่อสิ้นสุดฤดูกาลเก็บเกี่ยวผลผลิต เกษตรกรส่วนมากกำจัดวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้ด้วยวิธีการเผาในที่โล่งแจ้งซึ่งก่อให้เกิดหมอกควัน และฝุ่นละออง ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของเกษตรกร อีกทั้งยังเป็นสาเหตุของการเกิดปัญหาไฟไหม้ป่าที่ยากต่อการควบคุม (ณิชชา บุรณสิงห์, 2562) หลายหน่วยงานทั้งภาครัฐ เอกชน และสถาบันการศึกษาได้ร่วมกันหาแนวทางส่งเสริมการใช้ประโยชน์และสร้างมูลค่าให้วัสดุเหลือทิ้งที่ได้หลังการเก็บเกี่ยวข้าวโพด เพื่อให้เกษตรกรเห็นประโยชน์ และสามารถนำประยุกต์ใช้เพื่อลดการเผาในที่โล่งแจ้งได้มากขึ้น อีกทั้งยังสามารถสร้างรายได้จากผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ การนำผลิตถ่านจากซังข้าวโพดเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถสร้างประโยชน์ให้กับวัสดุเหลือทิ้งได้ ซึ่งสามารถทำได้โดยการนำมาอัดรีดขึ้นรูปเป็นเชื้อเพลิงแท่ง ดังงานวิจัยของ Sasujit et al. (2015) ที่นำซังข้าวโพด และเปลือกข้าวโพดมาขึ้นรูปเป็นเชื้อเพลิงแท่ง โดยใช้แฉ่งเป็นตัวประสานที่อัตราส่วนวัสดุต่อตัวประสาน 20:80 เชื้อเพลิงที่ได้มีค่าความร้อน 12.77 เมกะจูล/กิโลกรัม งานวิจัยของ อุศราวดี ชื่นทิม (2558) ที่มีการศึกษาถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิตถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดด้วยเตาปฏิกรณ์ภายใต้สภาวะไนโตรเจน พบว่าการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที สามารถได้ผลิตภัณฑ์เป็นถ่านชีวภาพสูงสุดร้อยละ 42.7 โดยน้ำหนัก ของเหลวและแก๊สร้อยละ 32.2 และ 25.1 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และหากอุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้นปริมาณถ่านชีวภาพจะลดลง และปริมาณของเหลวจะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ถ่านชีวภาพซังข้าวโพดสามารถนำไปใช้เป็นสารปรับปรุงดิน ดังงานวิจัยของประภัสสร รัตนไพบูลย์ (2562)

ที่ได้ในการเพาะปลูกค่น้ำ พบว่า ดินที่ผ่านการปรับปรุงด้วยถ่านชีวภาพซังข้าวโพดจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและน้ำ ส่งผลให้มีประจุลบสุทธิเพิ่มขึ้น และเนื่องจากถ่านชีวภาพมีความเป็นรูพรุนจึงช่วยกักเก็บน้ำและแร่ธาตุได้ดี และเป็นไปตามมาตรฐานถ่านชีวภาพสำหรับการนำไปใช้ทางการเกษตร นอกจากนี้ยังใช้เป็นถ่านซังข้าวโพดสำหรับการดูดซับ เช่น การศึกษาในงานวิจัยของ Alsherbeny et al. (2022) ที่มีการศึกษาการนำถ่านซังข้าวโพดที่ผ่านการไพโรไลซิสด้วยอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง ไปดูดซับสารกำจัดศัตรูพืชออกจากน้ำ พบว่า ถ่านซังข้าวโพดสามารถดูดซับได้ดีที่ระยะเวลา 60 นาที และถ่านซังข้าวโพดนั้นมีสมบัติไม่ชอบน้ำจึงเหมาะสมแก่การดูดซับสารกำจัดศัตรูพืชที่มีขั้วสูง

ถ่านชีวภาพ หรือไบโอชาร์ (Biochar) เป็นถ่านที่มีคาร์บอน (carbon:C) เป็นองค์ประกอบหลัก มีสมบัติเป็นตัวดูดซับที่ดี เนื่องจากมีพื้นที่ผิวขรุขระ มีรูพรุนจำนวนมาก สามารถผลิตจากชีวมวลหรือสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้จากธรรมชาติ เช่น กิ่งไม้ ฟางข้าว ซังข้าวโพด ต้นข้าวโพด เป็นต้น ปริมาณของคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ และฟอสฟอรัสในถ่านชีวภาพขึ้นอยู่กับชีวมวล (biomass) เริ่มต้น (Cole et al., 2019; ไววุฒิ ภูทอง และคณะ, 2557) ถ่านชีวภาพมีรูพรุนทั้งภายในและภายนอกจำนวนมาก ทำให้มีการนำไปใช้ประโยชน์ที่หลากหลาย เช่น การกักเก็บน้ำ การสร้างความร่วนซุยให้กับดิน และการสร้างแหล่งที่อยู่อาศัยของจุลินทรีย์ (Gwenzi et al., 2021; ประภัสสร รัตนไพบูลย์, 2562)

ถ่านชีวภาพผลิตด้วยกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน หรือกระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ไม่ใช้ออกซิเจนหรือใช้ในปริมาณเพียงเล็กน้อย โดยกระบวนการนี้จะทำให้สารประกอบอินทรีย์ขนาดใหญ่สลายตัวออกเป็นโมเลกุลขนาดเล็ก กระบวนการไพโรไลซิสสามารถแบ่งออกเป็น 2 กระบวนการ คือ กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า (slow pyrolysis) เป็นการเผาไหม้ด้วยการแยกสลายสารอินทรีย์แบบช้า ๆ ใช้ระยะเวลาเป็นชั่วโมง อุณหภูมิจะอยู่ในช่วง 400-600 องศาเซลเซียส (Hendriks & Zeeman, 2009; Huang et al., 2012; ประภัสสร รัตนไพบูลย์, 2562) และกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว (fast pyrolysis) จะใช้ระยะเวลาในการเผาไหม้เป็นวินาที อุณหภูมิจะอยู่ในช่วง 600-1,000 องศาเซลเซียส โดยผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสนั้นจะแบ่งออกเป็น ของแข็ง (ถ่านชีวภาพ) ของเหลว (น้ำมันชีวภาพ) และแก๊สสังเคราะห์ (Kuo-Chao et al., 2009; เบญจพร เครือทะนันไชย, 2557) พบว่า กระบวนการไพโรไลซิสทั้งสองได้ผลิตภัณฑ์หลักที่แตกต่างกันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบและความชื้นในวัตถุดิบ โดยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าจะมีผลิตภัณฑ์หลักในรูปแบบของเหลว (น้ำมันทาร์) ร้อยละ 30-50 ของแข็ง (ถ่าน) ร้อยละ 25-35 และแก๊สร้อยละ 10-15 ส่วนกระบวนการ

ไพโรไลซิสแบบเร็วผลิตภัณฑ์หลักรูปแบบของเหลว (น้ำมันทาร์) ร้อยละ 60-70 ของแข็ง (ถ่าน) ร้อยละ 15-25 และแก๊สร้อยละ 10-15 (เบญจพร เครือทะนันทไชย, 2557)

ปัจจุบันราคาน้ำมันเชื้อเพลิงปิโตรเลียมนั้นมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง จึงส่งผลกระทบต่อระบบเศรษฐกิจของประเทศไทยโดยตรง ประเทศไทยได้มีการนำเข้าน้ำมันเชื้อเพลิงปิโตรเลียมในปริมาณสูงเมื่อเทียบกับปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงปิโตรเลียมที่ผลิตได้ภายในประเทศ เนื่องจากความต้องการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงทั้งในภาคครัวเรือน ภาคอุตสาหกรรม ภาคขนส่ง และภาคการเกษตรนั้นมีแนวโน้มการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการค้นคว้าหาแนวทางในการพัฒนาพลังงานทางเลือกเพื่อทดแทนน้ำมันเชื้อเพลิงปิโตรเลียม เชื้อเพลิงชีวภาพเป็นพลังงานประเภทหนึ่งในหลายภาคส่วนที่ได้รับความสนใจ เนื่องจากเป็นพลังงานหมุนเวียนที่เกิดได้จากสารชีวมวลที่มีอยู่ในสิ่งแวดล้อมและสามารถเกิดขึ้นใหม่ได้ โดยเชื้อเพลิงชีวภาพที่ได้มีการศึกษาได้แก่ เอทานอล และ ไบโอดีเซล สำหรับเอทานอลนั้นจำเป็นต้องใช้วัตถุดิบหลักในการผลิต เช่น อ้อย มันสำปะหลัง ข้าวโพด เป็นต้น ซึ่งวัตถุดิบดังกล่าวมักนิยมใช้บริโภคซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อราคาที่สูงขึ้น (สุภาวดี ผลประเสริฐ, 2557) ซึ่งพบว่าน้ำมันไบโอดีเซล (Biodiesel) เป็นพลังงานทางเลือกที่ได้นำมาใช้ในภาคขนส่งทดแทนน้ำมันดีเซล และการใช้งานยังมีส่วนช่วยลดมลพิษทางด้านสิ่งแวดล้อม (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2558)

ไบโอดีเซลสามารถผลิตได้จากน้ำมันพืช โดยนำมาเข้าสู่กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (transesterification) ทั้งนี้การใช้น้ำมันพืชสำหรับการบริโภคเป็นวัตถุดิบหลัก เช่น น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันข้าวโพด น้ำมันดอกทานตะวัน (กุลชัช เทพจันทร์, 2558; ภัทรดิกรณ์ รัชศักดิ์ศรี, 2555) ได้ส่งผลให้การผลิตไบโอดีเซลมีต้นทุนที่สูงขึ้น จึงได้มีการส่งเสริมการผลิตไบโอดีเซล จึงได้มีการส่งเสริมการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ไม่สามารถบริโภคได้ พบว่าน้ำมันกลุ่มนี้จะมีปริมาณกรดไขมันอิสระสูง (free fatty acid: FFA) มากกว่าร้อยละ 2 (Rudy Prusko, 2020) ซึ่งส่งผลกระทบต่อการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน โดยเฉพาะปริมาณผลผลิตและความบริสุทธิ์ของน้ำมันไบโอดีเซล ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการกำจัดกรดไขมันอิสระในน้ำมันก่อนนำมาเป็นวัตถุดิบหลักที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล (Sulaiman, Shah, & Jamal, 2017; จักรพงษ์ ไชยบุรี และสรพงษ์ แสงสุวรรณ, 2556; กุลชัช เทพจันทร์, 2558) ซึ่งกระบวนการส่วนใหญ่จะนิยมใช้สารเคมีชนิดต่างในการลดปริมาณกรดไขมันอิสระ เช่น งานวิจัยของ Hoda, N. (2010) ที่มีการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันจากน้ำมันเมล็ดฝ้าย โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide: NaOH) เป็นสารเคมีหลักในการลดกรดไขมันอิสระ จากการศึกษาพบว่าการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.3 ที่อัตราส่วนโดยมวลเมทานอลของต่อน้ำมัน 6:1

เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ทำให้มีปริมาณกรดไขมันอิสระลดลงจากร้อยละ 0.08 จากร้อยละ 1.53 นอกจากนี้ยังมีการปรับสภาพน้ำมันด้วยปฏิกิริยาสองขั้นตอน เช่น งานวิจัยของ Berchmans et al. (2008) ที่มีการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดสบู่ดำ ซึ่งในขั้นตอนแรกจำเป็นการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริก (sulfuric acid: H_2SO_4) ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และใช้อัตราส่วนโดยมวลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จากนั้นปล่อยให้เย็น อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วจึงทำปฏิกิริยาขั้นที่สอง โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide: NaOH) ร้อยละ 1.4 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมัน 0.24:1 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ได้ไบโอดีเซลร้อยละ 90 และสามารถลดกรดไขมันอิสระให้เหลือเพียงร้อยละ 1 จากร้อยละ 15

จากกระบวนการที่กล่าวมาข้างต้น พบว่า แม้กระบวนการแรกใช้อุณหภูมิในการผลิตต่ำแต่ต้องใช้เวลาในการลดกรดไขมันอิสระค่อนข้างนาน ส่วนกระบวนการที่สองนั้นจำเป็นต้องใช้เครื่องมือ และพลังงานสูง จึงได้มีการพัฒนาการกำจัดกรดไขมันอิสระโดยอาศัยหลักการของการดูดซับด้วยวัสดุ ที่มีความเสถียร และมีโครงสร้างที่มีพื้นที่ผิวและความพรุนในระดับที่สูง พบว่าถ่านชีวภาพเป็นหนึ่งในวัสดุที่มีความพรุนสูงที่สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุในการดูดซับเพื่อลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันได้ (Ayu et al., 2018; Regmi et al, 2012; ไววุฒิ ภูทอง และคณะ, 2557) ซึ่งมีงานวิจัยหลายผลงานได้นำถ่านชีวภาพมาใช้เป็นวัสดุดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันที่กรดไขมันอิสระสูง ในการกระบวนการลดกรดไขมันอิสระมากขึ้น เช่น งานวิจัยของ Ayu et al. (2018) ที่มีการนำซีโอไลต์ที่ผ่านการแช่สารเคมีและเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ไปทำการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปรุงอาหาร พบว่าซีโอไลต์ที่ผ่านการแช่ด้วยด่างสามารถลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันจากร้อยละ 0.4 เหลือร้อยละ 0.15 จากการใช้อุณหภูมิในการดูดซับ 80 องศาเซลเซียส นาน 5 ชั่วโมง และงานวิจัยของ Chairgulprasert & Madlah (2018) ที่มีการนำถ่านจากกากกาแฟเผาด้วยอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมง มาดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มใช้แล้ว พบว่าการใช้ระยะเวลาในการดูดซับกรดไขมันอิสระ 330 นาที จะมีประสิทธิภาพการดูดซับกรดไขมันอิสระได้ร้อยละ 100 จากการดูดซับที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

ด้วยความสามารถในการเป็นตัวดูดซับของถ่านซังข้าวโพดจึงนำมาทำการคัดแปรสมบัติของถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด เพื่อนำไปใช้เป็นวัสดุดูดซับสำหรับการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืช ซึ่งเป็นแนวทางในการลดต้นทุนการใช้สารเคมีในขั้นตอนของการปรับสภาพน้ำมันพืช สำหรับในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลต่อไป ซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งของการใช้ประโยชน์จากของเสียนับสนุนการผลิตพลังงานได้

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อผลิตและวิเคราะห์สมบัติทางด้านชีวภาพจากซังข้าวโพดด้วยกระบวนการไพโรไลซิส
2. เพื่อประยุกต์ใช้ด้านชีวภาพจากซังข้าวโพดในการลดกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์มที่มีกรดไขมันอิสระสูง

ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. สามารถปรับปรุงสมบัติของถ่านชีวภาพซังข้าวโพดจากกระบวนการไพโรไลซิส
2. สามารถนำถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ผ่านการดัดแปรไปใช้เป็นตัวดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำพืช
3. สามารถจัดเป็นแนวทางการกำจัดซังข้าวโพดให้เกิดประโยชน์ โดยการเปลี่ยนวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรให้เป็นพลังงาน
4. สามารถลดการเผาทำลายวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่นำไปสู่การลดปริมาณฝุ่น PM 2.5

สมมติฐานการวิจัย

1. ถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ผ่านการดัดแปรด้วยสารเคมีมีพื้นที่ผิว และรูพรุนเพิ่มขึ้น และสามารถช่วยดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชได้
2. ถ่านชีวภาพมีพื้นที่ผิวและรูพรุนสูงได้รับการดัดแปร เพื่อทำให้มีประจุบวกเพิ่มขึ้น

ขอบเขตของการวิจัย

ขอบเขตด้านเนื้อหา

1. วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการศึกษา
 - 1.1. ซังข้าวโพด เป็นชีวมวลเหลือจากการแยกเมล็ดข้าวโพด จากอำเภอแม่แจ่ม จังหวัดเชียงใหม่ โดยมีการควบคุมความชื้นของซังข้าวโพดให้มีค่าน้อยกว่าร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก
 - 1.2. น้ำมันปาล์ม ซึ่งเป็นน้ำมันที่นิยมใช้ในการทอด เพื่อประกอบอาหาร โดยใช้กรดไขมันชนิดกรดปาล์มมิติก มีการเพิ่มกรดไขมันอิสระให้อยู่ในช่วงร้อยละ 5 โดยมวล
 - 1.3. น้ำมันพืชใช้แล้ว เพื่อศึกษาตามสภาพจริง

2. การศึกษากระบวนการผลิตถ่านชีวภาพและปรับปรุงสมบัติจากขังข้าวโพด

การศึกษากระบวนการผลิตถ่านชีวภาพจากขังข้าวโพด ด้วยวิธีการไพโรไลซิส ด้วยเตาขนาด 50 ลิตร พร้อมทั้งศึกษาสมบัติขังข้าวโพดแห้งก่อนเผาด้วยการวิเคราะห์แบบการประมาณ (proximate analysis) วิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ (ultimate analysis) และวิเคราะห์สมบัติความเสถียรของวัสดุเมื่อได้รับความร้อนด้วยเทคนิค thermo gravimetric analysis (TGA) จากนั้นศึกษาลักษณะเฉพาะของถ่านชีวภาพขังข้าวโพดที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสด้วยการวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีนนัมเบอร์ การวิเคราะห์ลักษณะพื้นที่ผิวจากรูพรุนของถ่านชีวภาพด้วยเทคนิค brunauer emmett-teller (BET) การศึกษาลักษณะเฉพาะทางสัณฐานวิทยาของถ่านชีวภาพด้วยเทคนิค scanning electron microscopy (SEM) การศึกษาองค์ประกอบ โครงสร้างทางเคมีและหมู่ฟังก์ชันของถ่านชีวภาพด้วยเทคนิค fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) พร้อมทั้งการศึกษาเปรียบเทียบกับถ่านชีวภาพขังข้าวโพดที่ผ่านการคัดแปรสมบัติด้วยสารเคมีกรดและด่าง

3. การศึกษากระบวนการดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์ม ด้วยถ่านชีวภาพจากข้าวโพด

การศึกษากระบวนการดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์ม ด้วยถ่านชีวภาพขังข้าวโพด โดยนำถ่านชีวภาพขังข้าวโพดที่สามารถดูดซับไอโอดีนสูงสุดมาใช้เป็นวัสดุดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์ม ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดซึ่งประกอบด้วย ปริมาณกรดไขมันอิสระ ปริมาณถ่านชีวภาพขังข้าวโพด ระยะเวลาในการดูดซับ ปริมาณน้ำมัน และอุณหภูมิในการดูดซับ ปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันได้รับการติดตามด้วยวิธีการไทเทรตกรด-เบส (acid-alkali titration) และเทคนิค fourier transform infrared spectrophotometry (FTIR)

ขอบเขตด้านเวลา

ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย 24 เดือน

ขอบเขตด้านสถานที่

1. วิทยาลัยพัฒนาเศรษฐกิจและเทคโนโลยีชุมชนแห่งเอเชีย มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
2. ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

นิยามศัพท์เฉพาะ

ถ่านชีวภาพซังข้าวโพด คือ วัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก โดยการนำซังข้าวโพดมาผ่านกระบวนการทางความร้อนภายใต้สภาวะจำกัดอากาศที่เรียกว่า กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า

การปรับปรุง หรือการตัดแปรถ่านชีวภาพ คือ การตัดแปรถ่านชีวภาพเพื่อให้มีสมบัติที่ดียิ่งขึ้นด้วยสารเคมีประเภทกรด และด่าง

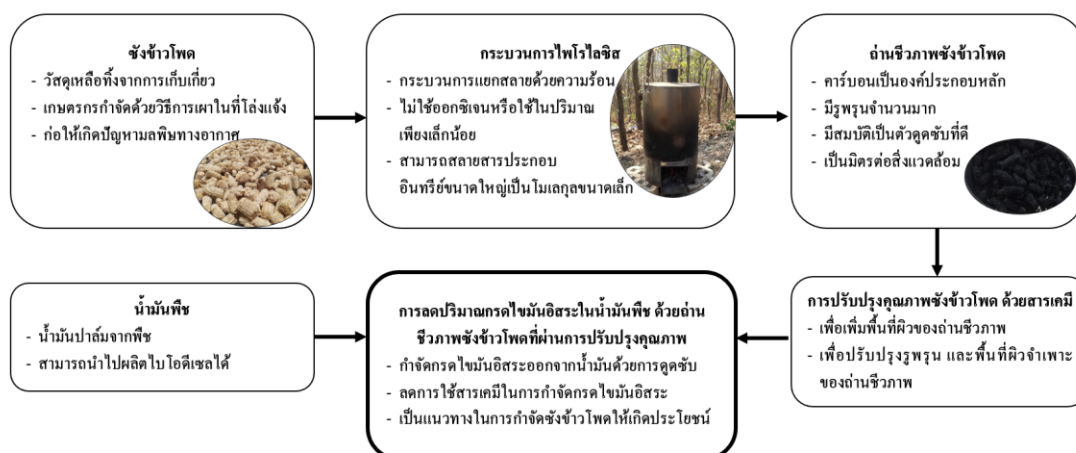
น้ำมันปาล์ม คือ น้ำมันปาล์มที่จำหน่ายตามท้องตลาด โดยจะมีการเพิ่มกรดไขมันอิสระ (กรดปาล์มมิติก) ให้อยู่ในช่วงร้อยละ 5 โดยมวล

การลดกรดไขมันอิสระ คือ การลดกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์มด้วยถ่านชีวภาพซังข้าวโพด

น้ำมันที่ผ่านการดูดซับกรดไขมันอิสระ คือ น้ำมันที่ผ่านการดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์มมีกรดไขมันอิสระเหลือน้อยกว่าร้อยละ 2 โดยมวล

กรอบแนวคิดการวิจัย

งานวิจัยนี้จึงมีการศึกษาแนวทางการกำจัดซังข้าวโพด โดยนำไปสู่การสร้างประโยชน์ด้วยการส่งเสริมการผลิตถ่านชีวภาพ สำหรับการนำไปใช้ประโยชน์เป็นวัสดุดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืช เพื่อทดแทนการใช้สารเคมีในขั้นตอนการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันสำหรับการนำไปผลิตเป็นไบโอดีเซล แสดงดังภาพที่ 1.1



ภาพที่ 1.1 กรอบแนวคิดการวิจัย

บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการดัดแปรสมบัติของถ่านชีวภาพจากขังข้าวโพด เพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืช สำหรับเป็นแนวทางในการลดใช้สารเคมีในการปรับสภาพกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชที่เป็นสารตั้งต้นในการผลิตไบโอดีเซล โดยแสดงถึงทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับชีวมวล กระบวนการไพโรไลซิส ถ่านชีวภาพ ลิพิด การเปลี่ยนแปลงทางเคมีของกรดไขมันและน้ำมัน การวิเคราะห์ความเป็นกรด และกระบวนการดูดซับ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ชีวมวล

ชีวมวล (biomass) คือ สารอินทรีย์ที่ได้จากสิ่งมีชีวิต ซึ่งเป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติที่สามารถนำมาหมักเป็นพลังงานทดแทนจากฟอสซิลได้ ชีวมวลประกอบด้วย ชาติคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน เป็นองค์ประกอบหลัก นอกจากนี้ยังมีไนโตรเจน ซัลเฟอร์ และธาตุอื่น ๆ รวมอยู่ด้วย ชีวมวลยังสามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานได้ เพราะพืชใช้คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และแสงอาทิตย์ เพื่อสังเคราะห์แสง ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ในรูปของแป้ง และน้ำตาลสะสมไว้ตามส่วนต่าง ๆ ของพืช เมื่อนำพืชมาใช้เป็นเชื้อเพลิงด้านการเผาไหม้จึงทำให้เกิดเป็นพลังงานความร้อน และนำพลังงานนั้นมาใช้ประโยชน์ด้านอื่น ๆ ต่อไปได้ (นคร ทิพย์าวงศ์, 2553; ประภัสสรรัตน์ ไพบูลย์, 2562; อรุณี ศุภสินสาริต, ม.ป.ป.)

โครงสร้างของชีวมวล

1. ลิกนิน

ลิกนินเป็นองค์ประกอบที่สร้างความแข็งแกร่งให้แก่ชีวมวล เนื่องจากมีสารประกอบของโพลีเมอร์อะโรมาติกที่ไม่มีรูปผลึกเกาะกันอยู่ในชั้นระหว่างเส้นใยซึ่งทำหน้าที่ยึดเกาะเส้นใยไว้ด้วยกัน โดยปกติลิกนินนั้นจะไม่ละลายน้ำและตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว และไม่สามารถย่อยได้ด้วยจุลินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน จึงสกัดลิกนินได้ด้วยตัวทำละลายสารอินทรีย์ที่มีขั้วสูงและสารละลายประเภทเบสเจือจางได้ ลิกนินจะอยู่กับเซลล์ลูโลส โดยมีพันธะโควาเลนต์ที่เชื่อมระหว่าง

ลิกนินและเฮมิเซลลูโลส ลิกนินเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของผนังเซลล์เนื้อไม้ชีวมวล โดยในเนื้อไม้อ่อนจะมีลิกนินประมาณร้อยละ 18-25 ส่วนในเนื้อไม้แข็งจะมีประมาณร้อยละ 25-35 (คุษฎีพร ลิทธิกุล, 2557; ประภัสสร รัตนไพบูลย์, 2562; อุศรา ชื่นทิม, 2558; Lawal et al., 2021; Wang et al., 2017)

2. เซลลูโลส

เซลลูโลส (cellulose) เป็นสารประเภทโพลีแซ็กคาไรด์ซึ่งจะพบมากในผนังเซลล์พืช เซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์สายยาว มีโครงสร้างเส้นใยขนาดเล็กมัดรวมกันอยู่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลจึงทำให้ผนังเซลล์พืชมีความแข็งแรงป้องกันการแตกของเซลล์ เซลลูโลสมีสูตรทางเคมีคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ และมีลักษณะโครงสร้างเป็นผลึก เซลลูโลสเป็นส่วนประกอบหลักของไม้ประมาณร้อยละ 40 (ประภัสสร รัตนไพบูลย์, 2562; อรุณี สุกตินสาธิต, ม.ป.ป.; อุศรา ชื่นทิม, 2558; Lawal et al., 2021; Wang et al., 2017)

3. เฮมิเซลลูโลส

เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) เป็นสารประเภทโพลีเมอร์ของพวกดีไซโลสมีการกระจายตัวอย่างอิสระในผนังเซลล์พืช ชีวมวลโดยส่วนมากมีเฮมิเซลลูโลสประมาณ 1 ใน 3 ของน้ำหนักแห้ง เฮมิเซลลูโลสจะประกอบด้วยโครงสร้างที่เป็นทั้งโซ่ตรงและโซ่กิ่งของน้ำตาลโดยจะมีสายสั้นกว่าเซลลูโลส ซึ่งส่วนใหญ่จะพบเฮมิเซลลูโลสในผนังเซลล์ชั้นนอกสุด เฮมิเซลลูโลสจะมีประมาณร้อยละ 20-30 ขององค์ประกอบในไม้ (คุษฎีพร ลิทธิกุล, 2557; ประภัสสร รัตนไพบูลย์, 2562; อุศรา ชื่นทิม, 2558; Lawal et al., 2021; Wang et al., 2017)

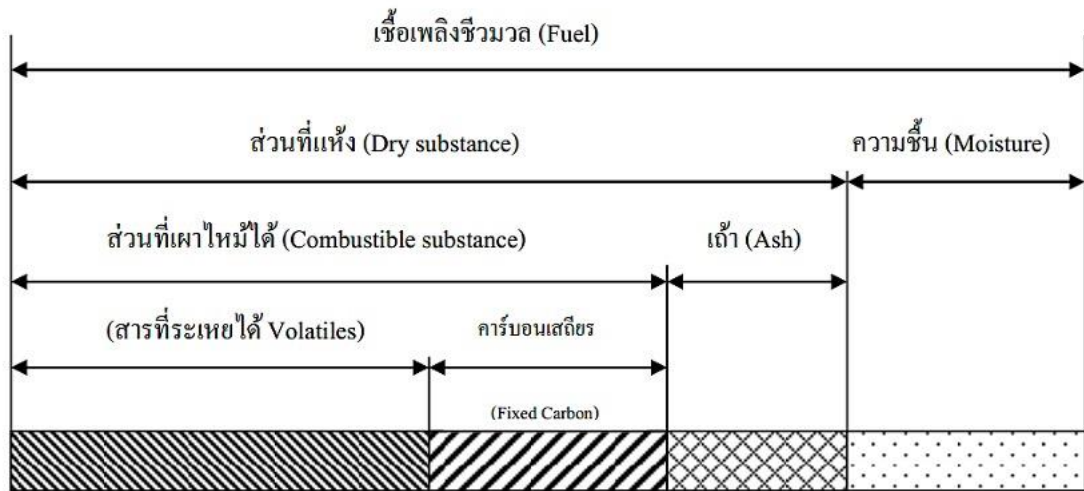
ส่วนประกอบของชีวมวล

ส่วนประกอบของชีวมวลโดยทั่วไปจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก (เบญจพร เครื่องมะมันไชย, 2557; อุศรา ชื่นทิม, 2558; Wang et al., 2017) ได้แก่

1. ความชื้น (Moisture) คือ ปริมาณของน้ำที่มีอยู่ภายในชีวมวล โดยส่วนมากภายในชีวมวลจะมีความชื้นค่อนข้างสูง ในการนำชีวมวลมาเผาไหม้เป็นพลังงาน ชีวมวลควรมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 50

2. ส่วนที่เผาไหม้ได้ (combustible substance) ส่วนที่เผาไหม้ได้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ปริมาณสารระเหย (volatile matter) และ คาร์บอนคงตัว (fixed carbon) โดยปริมาณสารระเหยนั่นคือส่วนที่สามารถจุดติดไฟที่ทำให้เกิดการเผาไหม้ได้ง่าย ส่วนคาร์บอนคงตัว คือ ส่วนประกอบของคาร์บอนที่เหลืออยู่

3. ส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ คือ เถ้า (ash) ซึ่งมวลโดยส่วนใหญ่จะมีเถ้าร้อยละ 1-3 ซึ่งหากปริมาณเถ้ามากกว่านี้ จะส่งผลให้เกิดปัญหาในการเผาไหม้และยากในขั้นตอนของการกำจัด โดยส่วนประกอบของชีวมวลทั้ง 3 ส่วน แสดงดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ส่วนประกอบของชีวมวล
ที่มา : อูศรา ชื่นทิม, 2558

ซังข้าวโพด

ซังข้าวโพด คือ ส่วนที่ได้จากการสีนํ้าแอมลัดข้าวโพดไปใช้งาน การเก็บเกี่ยวผลผลิตของเมล็ดข้าวโพดในปัจจุบันจะมีทั้งการใช้แรงงานและเครื่องจักร โดยการใช้แรงงานจะเป็นในส่วนของการเก็บข้าวโพดจากแปลงการเพาะปลูก จากนั้นจะนํามาสีเพื่อเอาเมล็ดออกโดยการใช้เครื่องจักร ซังข้าวโพดที่เหลือจากการนํามาสีออกจึงมีปริมาณมาก และเป็นปัญหาในการกำจัด เนื่องจากสามารถเกิดความชื้นได้ง่าย นำไปสู่การเกิดปัญหาการส่งกลิ่นเหม็นในชุมชน เกษตรกรโดยส่วนใหญ่จะเลือกวิธีการกำจัดด้วยการเผาในที่โล่งแจ้ง เนื่องจากเป็นวิธีการกำจัดที่ง่ายและสะดวก แต่ส่งผลให้เกิดปัญหาหมอกภาวะทางอากาศที่นำไปสู่ผลกระทบต่อสุขภาพคุณภาพชีวิตของประชาชนในพื้นที่ (อูศรา ชื่นทิม, 2558; Jahirul et al., 2012; Liu et al., 2014)

ซังข้าวโพดจะประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินประมาณร้อยละ 45, 35 และ 15 ตามลำดับ (Jahirul et al., 2012) ซึ่งโดยทั่วไปซังข้าวโพดจะมีความชื้นประมาณร้อยละ 4.29 ข้าวโพด จะมีปริมาณเมล็ดข้าวโพดประมาณร้อยละ 82 และซังข้าวโพดประมาณร้อยละ 18

ซึ่งคิดเป็นอัตราส่วนของซังข้าวโพดต่อผลผลิตของข้าวโพดจะอยู่ที่ประมาณร้อยละ 0.273 (ภาณุ พร้อมพุททรางกูร, น้อมจิตต์ แก้วไทย อันเดร และฐาปณี ศรีชุมพวง, 2558)

กระบวนการไพโรไลซิส

กระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่ทำให้ชีวมวลเกิดการแตกตัวทางความร้อนในสภาวะไร้ออกซิเจน หรือมีอากาศเข้าระบบน้อยที่สุด โดยเกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวล ประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และ ลิกนิน ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ขนาดใหญ่ที่เป็น โข้ยขาวแตกออกเป็น โมเลกุลขนาดเล็ก (Hendriks & Zeeman, 2009; Huang et al., 2012; Kuo-Chao et al., 2009) ในรูปของของแข็ง (ถ่านชีวภาพ) ของเหลว (น้ำมันชีวภาพ) และแก๊ส กระบวนการไพโรไลซิสสามารถแบ่งประเภทของกลไกการไพโรไลซิสออกตามอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลได้ 2 กระบวนการ คือ กระบวนการไพโรไลซิสอย่างช้า (slow pyrolysis) และกระบวนการไพโรไลซิสอย่างรวดเร็ว (fast pyrolysis) (ชนิดา มฤคทัต, 2550; เบนจพร เครือทะนันทไชย, 2557; ประภัสสร รัตนไพบูลย์, 2562) ดังนี้

1. กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า (slow pyrolysis) เป็นกระบวนการถ่ายเทความร้อนให้แก่ชีวมวลอย่างช้า ๆ โดยจะใช้อุณหภูมิอยู่ในช่วง 400-600 องศาเซลเซียส และมีอัตราการให้ความร้อนไม่เกิน 10 องศาเซลเซียส/min ใช้ระยะเวลาในการไพโรไลซิสโดยรักษาอุณหภูมิให้อยู่นิ่งมากกว่า 5 นาทีขึ้นไป หรือใช้ระยะเวลาหลายชั่วโมงอาจนานเป็นวัน ขนาดของวัตถุดิบที่ใช้มีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 2 มิลลิเมตร ในกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้ามักได้ผลิตภัณฑ์เป็นของเหลวย้อยละ 30-50 และเป็นถ่านร้อยละ 25-35

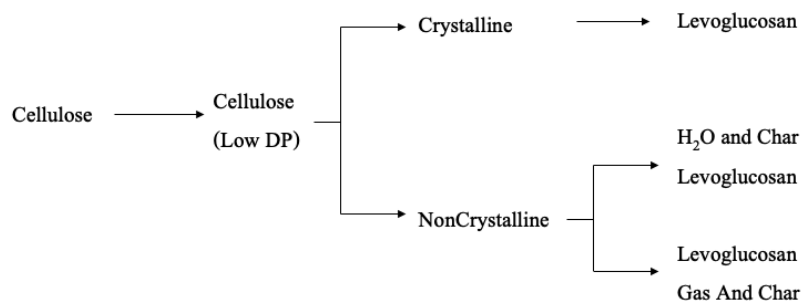
2. กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว (fast pyrolysis) เป็นกระบวนการให้ความร้อนแก่ชีวมวลในช่วงอุณหภูมิ 600-1,000 องศาเซลเซียส และมีอัตราการให้ความร้อนอยู่ในช่วง 10-100 องศาเซลเซียสต่อวินาที และรักษาอุณหภูมิไพโรไลซิสให้อยู่ในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ ขนาดของวัตถุดิบที่ใช้มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 2 มิลลิเมตร ในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วมักได้ผลิตภัณฑ์เป็นของเหลวประมาณร้อยละ 60-70 ของแข็งร้อยละ 15-25 และแก๊สร้อยละ 10-15 โดยจะขึ้นอยู่กับปริมาณ และชนิดของวัตถุดิบ

กลไกและขั้นตอนการเผาไพโรไลซิสภายในชีวมวล

กลไกการเผาไพโรไลซิสแบบช้าขององค์ประกอบต่าง ๆ ในชีวมวล ประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยแต่ละโครงสร้างและองค์ประกอบของชีวมวลแต่ละชนิดจะต่างกัน ส่งผลให้ได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกัน กลไกการไพโรไลซิสขององค์ประกอบต่าง ๆ (ชนิดา มฤคทัต, 2550; เบญจพร เครือทะนันทไชย, 2557; ประภัสสร รัตนไพบูลย์, 2562) ในชีวมวลสามารถอธิบายได้ ดังนี้

1. การสลายตัวของเซลลูโลส (cellulose pyrolysis)

1.1. ช่วงอุณหภูมิต่ำ หรือน้อยกว่า 250 องศาเซลเซียส โดยจะเกิดการแตกพันธะไกลโคซิดิก (glycosidic) ที่ขอบระหว่างโครงสร้างรูปผลึก และอสัณฐานด้วยอัตราการเกิดอันดับศูนย์ ($n=0$) มีอัตราการพอลิเมอร์ไรเซชันลดลงอย่างรวดเร็วจาก 1,000 หน่วย เหลือเพียง 200 หน่วย โครงสร้างรูปผลึกจะมีการเปลี่ยนแปลงเป็นพวกลิวโกลูโคซาน (levoglucosan) ในโครงสร้างของอสัณฐาน และมีการแตกของสายเซลลูโลสเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน ทำให้เกิดการแยกตัวของอะตอมไฮโดรเจนจากอะตอมของคาร์บอน และมีการดึงอะตอมไฮโดรเจนจากสายพอลิเมอร์ข้างเคียง ส่งผลทำให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมต่อระหว่างโมเลกุล (cross link) ได้เป็นผลิตภัณฑ์จำพวกถ่าน (char) แสดงดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2

การไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่ำ

ที่มา :

เบญจพร เครือทะนันทไชย, 2557

1.2. ช่วงอุณหภูมิ 250-500 องศาเซลเซียส เกิดการแตกตัวของเซลลูโลสอย่างรวดเร็ว และเกิดปฏิกิริยาดีพอลิเมอร์ไรเซชัน (depolymerization) และดีไฮเดรชัน (dehydration) ทำให้เกิดการไอน้ำ ความชื้นออกจากวัสดุ เกิดผลิตภัณฑ์เป็นถ่าน ทั้งนี้ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาของเซลลูโลสนั้นประกอบด้วย อุณหภูมิ เวลาในการให้ความร้อน ชนิดของชีวมวล เป็นต้น

1.3. ช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่า 500 องศาเซลเซียส เกิดผลิตภัณฑ์เป็นถ่านชีวภาพมากขึ้น

2. การสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส (hemicellulose pyrolysis)

การไพโรไลซิสเฮมิเซลลูโลส หรือพอลิเมอร์ของน้ำตาลจะก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สปริมาณมาก และได้น้ำมันชีวภาพน้อยกว่าเซลลูโลสในช่วงอุณหภูมิเดียวกัน กลไกของการเกิดไพโรไลซิสของเฮมิเซลลูโลสจะมีการสลายตัว 2 ขั้นตอน คือ ในขั้นแรกเกิดดีพอลิเมอร์ไรเซชันไปเป็นพวกสารที่สามารถละลายน้ำได้ และในขั้นต่อมาจะเกิดการสลายตัวเป็นสารระเหย

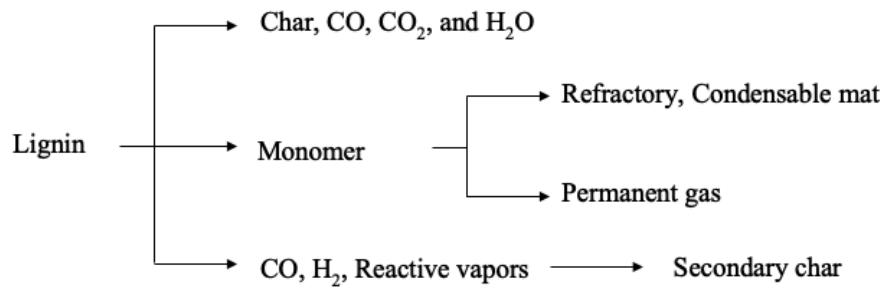
3. การสลายตัวของลิกนิน (lignin pyrolysis)

ลิกนินเป็นส่วนประกอบที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ และมีโครงสร้างต่าง ๆ รวมกัน จึงทำให้มีโครงสร้างที่แข็งแรง ในการสลายลิกนินโดยใช้ความร้อนนั้นจะเกิดปฏิกิริยาได้หลายรูปแบบ โดยการสลายตัวของลิกนิน แสดงดังภาพที่ 2.3 สามารถอธิบายได้ดังนี้

3.1. ช่วงอุณหภูมิต่ำ หรือน้อยกว่า 250 องศาเซลเซียส จะเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันเพื่อกำจัดน้ำและความชื้นออกจากวัสดุ แล้วเกิดปฏิกิริยาเชื่อมระหว่างโมเลกุล เกิดผลิตภัณฑ์เป็นถ่านชีวภาพ และแก๊สเพิ่มขึ้น

3.2. ช่วงอุณหภูมิ 250-500 องศาเซลเซียส เกิดปฏิกิริยามอนอเมอร์ ซึ่งหากมีความร้อนและความดันต่ำ จะทำให้เกิดการมอนอเมอร์ลิกนินได้ดี

3.3. ช่วงอุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส เกิดปฏิกิริยา 2 แบบ คือ มอนอเมอร์ที่เกิดในลำดับที่ 2 ซึ่งเกิดการแตกตัวกลายเป็นไอ และเกิดการไพโรไลซิสได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊ส จำพวกคาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอื่น ๆ และเมื่อได้รับความร้อนอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดการควบแน่นของสารที่เหลืออยู่ให้เป็นไอในสภาวะอิมตัวยิ่งยวด ทำให้ได้ถ่านและมีปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูง



ภาพที่ 2.3 การไพโรไลซิสของลิกนิน

ที่มา : เบนจพร เครือทะนันทไชย, 2557

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการเผาไพโรไลซิส

กระบวนการไพโรไลซิสนั้นมีปัจจัยหลายประการที่ส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์แตกต่างกัน สามารถอธิบายได้ ดังนี้ (จักรพล โพธิ์ประสิทธิ์, 2547; เบนจพร เครือทะนันทไชย, 2557; ประภัสสร รัตนไพบูลย์, 2562)

1. ชนิดของวัสดุ ชีวมวลแต่ละชนิดนั้นมีองค์ประกอบภายในแตกต่างกัน ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสแตกต่างกัน อาทิ เช่น ชีวมวลที่เป็นเนื้อไม้จะมีองค์ประกอบของเซลลูโลสสูง เมื่อนำมาทำการไพโรไลซิสจะทำให้เซลลูโลสเกิดการย่อยสลายอย่างรวดเร็ว และกลายเป็นแก๊สหรือสารระเหย แต่สำหรับชีวมวลที่มีองค์ประกอบของลิกนินสูงจะเกิดการไพโรไลซิสอย่างช้า ๆ และได้ผลิตภัณฑ์ส่วนมากเป็นถ่านชีวภาพ

2. ขนาดของวัสดุ วัสดุที่มีขนาดเล็กจะทำให้กระบวนการสลายด้วยความร้อน หรือปฏิกิริยาระหว่างไอกับของแข็งลดลง เนื่องจากวัสดุที่มีขนาดเล็กจะเกิดการสลายตัวกลายเป็นถ่านชีวภาพได้เร็วกว่าวัสดุที่มีขนาดใหญ่ กระบวนการสลายด้วยความร้อนจะเกิดการจากผิวด้านนอกสู่แกนกลางของชีวมวล ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นน้ำมันชีวภาพ ไอหรือแก๊สมากขึ้น และสามารถนำกลับมาทำปฏิกิริยาอีกครั้งได้ น้ำมันชีวภาพที่ได้จากวัสดุที่มีขนาดใหญ่จะมีความหนืดมากกว่าวัสดุที่มีขนาดเล็ก

3. อุณหภูมิ มีผลต่อปริมาณและชนิดของผลิตภัณฑ์ที่สามารถผลิตได้ เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสต่ำจะส่งผลให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นของแข็ง หรือถ่านชีวภาพในปริมาณมาก แต่หากอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสสูงจะทำให้เกิดปริมาณแก๊สสูง

4. อัตราการให้ความร้อน เป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดในกระบวนการไพโรไลซิส โดยการใช้อัตราความร้อนอย่างช้า ๆ จะทำให้เกิดปริมาณผลิตภัณฑ์เป็นถ่านชีวภาพสูง หรืออาจเรียกว่ากระบวนการคาร์บอนในเซชัน แต่หากมีอัตราการให้ความร้อนอย่างรวดเร็ว จะส่งผลให้เกิดผลิตภัณฑ์ในรูปแบบของเหลว หรือน้ำมันทาร์มากยิ่งขึ้น

5. รูปแบบหรือประเภทของเครื่องปฏิกรณ์ ส่งผลต่อการถ่ายโอนความร้อนภายในกระบวนการไพโรไลซิสของวัสดุ ซึ่งจะส่งผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้

ถ่านชีวภาพ

ถ่านชีวภาพ (biochar) เป็นวัสดุที่ประกอบด้วยคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักคาร์บอน มีความเป็นรูพรุนสูง เกิดจากการจากกลุ่มอินทรีย์วัตถุจากชีวมวล เช่น ไม้ ช้างข้าวโพด แกลบ ฟางข้าว หรือวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรต่าง ๆ เมื่อถูกนำมาผ่านกระบวนการทางความร้อนในรูปแบบกระบวนการทางเคมีความร้อน ภายใต้สภาวะไร้อากาศ หรือจำกัดอากาศ ซึ่งเรียกว่ากระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) โดยทั่วไปจะมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบมากกว่าร้อยละ 50 ในองค์ประกอบทั้งหมดของถ่านชีวภาพ เนื่องจากมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักจึงทำให้ถ่านชีวภาพเป็นแหล่งกักเก็บคาร์บอน สามารถลดปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศได้ อีกทั้งความเป็นรูพรุนของถ่านชีวภาพนั้นมีสมบัติเป็นตัวดูดซับที่ดี สามารถกักเก็บอาหาร หรือแร่ธาตุในดินให้แก่พืช และมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุสูง นอกจากนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นพลังงานทดแทน เพื่อใช้ในภาคอุตสาหกรรมขนส่ง (เบญจพร เครือทนะน ไชย, 2557; ประภัสสร รัตนไพบูลย์ 2562; Gwenzi et al., 2021; Kumar, Saini & Bhaskar, 2020)

โครงสร้างของถ่านชีวภาพ

ถ่านชีวภาพมีส่วนประกอบหลักประกอบด้วยโครงสร้างที่ซับซ้อนของสารประกอบคาร์บอนแบบอะโรมาติก (aromatic compounds) และแอลิฟาติก (aliphatic compounds) กับสารประกอบอินทรีย์ (organic compounds) รวมถึงแร่ธาตุ (mineral compounds) ที่อยู่ในวัตถุดิบตั้งต้น โครงสร้างของถ่านชีวภาพโดยส่วนมากจะเป็นโครงสร้างที่ไม่เป็นผลึก (amorphous) แต่จะมีส่วนที่เป็นผลึกอยู่บางบริเวณ ซึ่งเป็นผลึกโครงสร้างแบบอะโรมาติกของคาร์บอน

ถ่านชีวภาพโดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นอนุภาคผลึกที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร โดยในเชิงวัสดุศาสตร์โครงสร้างถ่านชีวภาพมีส่วนประกอบหลักเป็นแผ่นแกรไฟต์จำนวนหลายแผ่นซ้อนกันเป็นชั้น (graphite-like layers arranged stacking) นอกจากนี้เมื่อทำการแยกแผ่นแกรไฟต์เหล่านี้ออกจากกัน พบว่าจะได้เป็นแผ่นแกรฟีน (graphene) ที่มีลักษณะโครงสร้างอะตอม

ของคาร์บอนคล้ายกับแผ่นแกรไฟต์แต่มีความเป็นผลึกสูงและบางกว่า ส่งผลให้มีสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีกว่าแกรไฟต์ หรือนิยามได้ว่าแกรไฟต์เกิดจากการนำแกรไฟท์หลายๆชั้นมาเรียงซ้อนกัน

สำหรับถ่านชีวภาพที่ได้ส่วนมากมาจากการเผาไพโรไลซิสของวัตถุดิบชีวมวล จึงทำให้ถ่านชีวภาพที่ได้มีส่วนผสมของแร่ธาตุ รวมถึงมีส่วนผสมของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ (inorganic compounds) จำนวนมาก ทำให้โครงสร้างแกรไฟต์ของถ่านชีวภาพที่ได้มีความไม่สมบูรณ์ เช่น มีรูพรุนเกิดขึ้นจำนวนมาก (macro, meso and micropores) จากการระเหยของสารอินทรีย์ในขั้นตอนการเผาไพโรไลซิส นอกจากนี้ความแข็งแรงของโครงสร้างถ่านชีวภาพพบว่าจะขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของเส้นใยจากวัตถุดิบชีวมวล (morphologies of cellular biomass origin) ที่จะกลายสภาพมาเป็น โครงสร้างแกรไฟต์ภายหลัง โดยปัจจัยนี้จะส่งผลต่อความแข็งแรงและคุณภาพของถ่านชีวภาพหลังการเผาไพโรไลซิส และเนื่องจากถ่านชีวภาพที่ได้มีส่วนประกอบของคาร์บอนเป็นหลักทำให้ มีความแข็งแรงและมีความเสถียร ไม่ทำปฏิกิริยาหรือถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ (microorganisms) ได้ง่าย (Downie, Crosky & Munroe, 2009; Gwenzi et al., 2021; Lawal et al., 2021)

สมบัติของถ่านชีวภาพ

สมบัติทางเคมีและกายภาพของถ่านชีวภาพ สามารถอธิบายได้ดังนี้

1. สมบัติทางเคมีของถ่านชีวภาพ

ถ่านชีวภาพมีโครงสร้างทางเคมีเป็น high aromatic โดยจะสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้สูง เกิดหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ โดยเฉพาะหมู่คาร์บอกซิล (COO⁻) ส่งผลให้ถ่านชีวภาพมีพื้นที่ผิวเป็นประจุลบสูง จึงมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุสูง สมบัติทางเคมีของถ่านชีวภาพ (อุศรา ชื่นทิม, 2558; Gwenzi et al., 2021; Sohi et al., 2010) สามารถอธิบายได้ดังนี้

1.1. ปริมาณคาร์บอนคงตัว โดยทั่วไปในถ่านชีวภาพจะมีปริมาณคาร์บอนคงตัวประมาณร้อยละ 50-95 ทั้งนี้ปริมาณคาร์บอนคงตัวจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการเผาสูงขึ้น

1.2. ปริมาณสารระเหย โดยทั่วไปปริมาณสารระเหยในถ่านชีวภาพจะมีอยู่ประมาณร้อยละ 0-40 ซึ่งเป็นส่วนประกอบของคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) และออกซิเจน (O) ทั้งนี้ปริมาณสารระเหยจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการเผา เมื่ออุณหภูมิการเผาสูงขึ้นปริมาณสารระเหยจะลดลง

1.3. ปริมาณเถ้า ถ่านชีวภาพจะมีปริมาณเถ้าประมาณร้อยละ 0.5-5 โดยจะขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล ซึ่งเป็นสารอนินทรีย์ที่เหลือจากการเผาไหม้

1.4. ปริมาณความชื้น โดยความชื้นต่อปริมาณของเนื้อถ่านชีวภาพที่แห้งแล้ว ถ่านที่ได้รับการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์จะมีความชื้นอยู่ประมาณร้อยละ 5-10 แต่หากที่มีการเผาไหม้ไม่ดีจะมีน้ำมันคาร์ และมีความชื้นมากกว่าร้อยละ 15 โดยความชื้นนี้จะส่งผลให้ค่าความร้อนของ ถ่านชีวภาพลดลง และเกิดการแตก ร่อนได้ง่าย

1.5. ค่าความร้อนของถ่าน ชีวมวลที่ผ่านกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนจะมีค่าความร้อนเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา เนื่องจากสารประกอบจำพวกกลีซิน เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสเกิดการสลายตัว ทำให้ได้คาร์บอนเป็นหลัก ค่าความร้อนของถ่านจึงเพิ่มขึ้น

2. สมบัติทางกายภาพของถ่านชีวภาพ

สมบัติของถ่านชีวภาพแตกต่างกัน โดยจะขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต อุณหภูมิในการให้ความร้อนในการผลิต ปริมาณออกซิเจน และระยะเวลาในการผลิต โดยสมบัติทางกายภาพของถ่านชีวภาพ (Cantrell et al., 2012; Kim et al., 2012; Sohi et al., 2010) สามารถอธิบายได้ดังนี้

2.1. การเปลี่ยนแปลงสีของชีวมวลด้วยกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน เมื่อชีวมวลได้รับความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วง 200 องศาเซลเซียส ชีวมวลจะมีสีน้ำตาลเข้ม แต่หากอุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่ 300 องศาเซลเซียส ชีวมวลจะมีสีน้ำตาลเข้มมากยิ่งขึ้น และจะมีสีดำสนิท เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 350 องศาเซลเซียส แต่หากอุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่ 400 องศาเซลเซียส ชีวมวลจะมีความดำสนิท เพราะ คัลายถ่าน และที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ชีวมวลจะมีสีดำสนิท แต่จะมีสีน้ำตาลเกรียมอยู่ตรงกึ่งกลาง

2.2. ความพรุนของถ่านชีวภาพ จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของกระบวนการสลายด้วยความร้อนเพิ่มขึ้น และขนาดของรูพรุนจะมีขนาดเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน การจัดตัวของ โครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบจะส่งผลต่อรูพรุนระหว่างผลึก โคนรูพรุนของถ่านชีวภาพส่วนใหญ่จะเป็นรูพรุนประเภทไมโครพอร์ ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนประมาณ 0.5-1.2 nm และมีปริมาตรรูพรุน (total pore volume) ประมาณ $0.03-0.09 \text{ cm}^3/\text{g}$

2.3. องค์ประกอบและโครงสร้าง การสลายตัวของวัตถุดิบเมื่อได้รับความร้อนจะทำให้พันธะเคมีเกิดการแตกตัวของสารกลุ่มอะโรมาติกอินทรีย์ ซึ่งองค์ประกอบหลักภายในถ่านชีวภาพเป็นคาร์บอนในรูปของอสัณฐานคาร์บอน (amorphous carbon) โดยจะมีการเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมเป็นแบบวงแหวนอะโรมาติก ผลึกของถ่านชีวภาพจึงมีความเสถียรสูง ซึ่งการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนยังขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต และเป็นผลให้ถ่านชีวภาพมีลักษณะรูพรุนเกิดขึ้น

2.4. พื้นที่ผิวจำเพาะมีความสำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยาทั้งกายภาพและเคมี โดยถ่านชีวภาพที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากจะเกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น มีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น

การดัดแปรคุณภาพของถ่านชีวภาพ

การปรับปรุง หรือดัดแปรถ่านชีวภาพเพื่อให้ถ่านชีวภาพมีสมบัติที่ดียิ่งขึ้น เหมาะสมแก่การนำไปใช้งานตามวัตถุประสงค์ต่าง ๆ สามารถอธิบายได้ดังนี้

1. การเกิดออกซิเดชันทางเคมี (chemical oxidation) เป็นการเกิดออกซิเดชันบนพื้นผิวของถ่านชีวภาพ เพื่อเพิ่มกลุ่มฟังก์ชันที่มีออกซิเจน เช่น ไฮดรอกซิล (-OH), คาร์บอกซิล (-COOH) เป็นต้น ส่งผลให้เกิดความชอบน้ำหรือมีขั้วเพิ่มขึ้น ขนาดรูพรุนและโครงสร้างของถ่านชีวภาพจะเปลี่ยนแปลงไป สารเคมีที่นิยมใช้ในการออกซิเดนต์ (oxidant) ได้แก่ HCl, HNO₃, H₂O₂, H₃PO₄ เป็นต้น (Yang et al., 2019; Dong et al., 2017; Kofodyńska, Krukowska, & Thomas, 2017; Fu et al., 2017; Zuo, Liu, & Chen., 2016; Zhao et al., 2017)

2. การเกิดรีดักชันทางเคมี (chemical reduction) เป็นการดัดแปร หรือปรับปรุงอัลคาไลน์ โดยใช้สารเคมีเพื่อลดกลุ่มฟังก์ชันบนพื้นผิวถ่านชีวภาพ เพื่อปรับปรุงรูพรุนและพื้นที่ผิวจำเพาะซึ่งเป็นการดัดแปรสภาพของถ่านชีวภาพที่ไม่มีขั้ว สารเคมีที่นิยมใช้เป็นสารรีดิวซ์ (reducing agent) ได้แก่ NaOH, KOH, NH₄OH เป็นต้น (Yang et al., 2019; Li et al., 2017; Wang, Wang, & Wang, 2018; Li, Liu, & Liu, 2011; Sizmur et al., 2017)

3. การใช้โลหะเป็นตัวเคลือบผิว (metal impregnation) เป็นการดูดซับไอออนของโลหะเข้าสู่พื้นผิว และรูพรุนของถ่านชีวภาพ ส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้น ไอออนของโลหะที่นิยมใช้ ได้แก่ เหล็ก แมกนีเซียม เงิน สังกะสี เป็นต้น (Yang et al., 2019; Yin et al., 2018; Li et al., 2016; Wu et al., 2017)

นอกจากนี้ยังมีวิธีการปรับปรุง และดัดแปรถ่านชีวภาพอื่น ๆ เช่น การใช้พลาสมาการออกซิเดชันด้วยโอโซน เป็นต้น แต่ยังไม่เป็นที่นิยมแพร่หลาย เนื่องจากเป็นวิธีที่มีความซับซ้อนและมีค่าใช้จ่ายสูง (Yang et al., 2019)

การวิเคราะห์สมบัติของซังข้าวโพด และถ่านชีวภาพซังข้าวโพด

ซังข้าวโพด และถ่านชีวภาพซังข้าวโพดในงานวิจัยนี้ได้มีการวิเคราะห์สมบัติ โดยอาศัยหลักการ เทคนิคและเครื่องมือดังต่อไปนี้

1. การวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) เป็นการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุเพื่อหาค่าประกอบ หรือ โครงสร้างทางกายภาพ ประกอบด้วย (Chen et al., 2016; Biswas et al., 2017)

1.1. ความชื้น (moisture) สามารถดำเนินการตามมาตรฐานของ ASTM D 3173 โดยให้ความร้อนแก่วัสดุ (A) นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 – 110 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำวัสดุออกจากตู้อบเก็บไว้ในโถดูดความชื้น เพื่อให้อุณหภูมิของวัสดุเท่ากับ อุณหภูมิห้อง และชั่งน้ำหนัก (B) พร้อมทั้งคำนวณน้ำหนักที่หายไป ค่าความชื้นมาตรฐานเปียกสามารถคำนวณจาก สมการที่ 2.1

สมการ

$$\text{Moisture (\%)} = \frac{(A - B)}{A} \times 100 \quad (2.1)$$

เมื่อ A คือ น้ำหนักของวัสดุก่อนอบ (g)

B คือ น้ำหนักของวัสดุหลังอบ (g)

1.2. เถ้า (ash) สามารถดำเนินการตามมาตรฐานของ ASTM D 3174 เพื่อหาปริมาณของสารอนินทรีย์ที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ โดยการนำวัสดุไปเผาในเตาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส จนกระทั่งได้น้ำหนักคงที่ของเถ้าที่เหลือ โดยสามารถคำนวณจาก สมการที่ 2.2

สมการ

$$\text{Ash (\%)} = \frac{C}{D} \times 100 \quad (2.2)$$

เมื่อ C คือ น้ำหนักของวัสดุก่อนเผา (g)

D คือ น้ำหนักของวัสดุหลังเผา (g)

1.3. ปริมาณสารระเหย (volatiles matter) สามารถดำเนินการมาตรฐานของ ASTM D 3175 สารระเหยเป็นองค์ประกอบของวัสดุที่มีลักษณะเป็นแก๊ส ซึ่งโดยส่วนมากจะประกอบด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน ไฮโดรเจน น้ำ และสารระเหยจากทาร์ (tar) ปริมาณสารแต่ละชนิดจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางอินทรีย์ของวัสดุนั้น ๆ การวิเคราะห์ปริมาณสารระเหยจะเกิดเมื่อวัสดุถูกนำมาเผาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6-7 นาที และคำนวณร้อยละของน้ำหนักที่หายไปลบด้วยความชื้น โดยสามารถคำนวณจาก สมการที่ 2.3

สมการ

$$\text{Volatiles Matter (\%)} = [(E - F) / E \times 100] - \text{Moisture (\%)} \quad (2.3)$$

เมื่อ E คือ น้ำหนักของวัสดุก่อนเผา (g)
F คือ น้ำหนักของวัสดุหลังเผา (g)

1.4. ปริมาณคาร์บอนคงตัว (fixed carbon) สามารถดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D 3172 ซึ่งแสดงถึงปริมาณของสารประกอบคาร์บอนที่คงเหลืออยู่ภายหลังการเผาไหม้เอาสารระเหยออก โดยปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงจะแสดงถึงปริมาณองค์ประกอบคาร์บอนสูง ส่งผลให้วัสดุสามารถจุดติดไฟได้นาน โดยสามารถคำนวณจาก สมการที่ 2.4

สมการ

$$\text{fixed carbon (\%)} = 100 - [(\% \text{moisture}) + (\% \text{ash}) + (\% \text{volatiles matter})] \quad (2.4)$$

2. การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) เป็นการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุเพื่อหาปริมาณธาตุคาร์บอน (C) ธาตุไฮโดรเจน (H) ธาตุไนโตรเจน (N) ธาตุกำมะถัน (S) และออกซิเจน (O) ที่มีอยู่ภายในวัสดุ โดยสามารถวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D 3176 ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ CHNS (Chen et al., 2016; Biswas et al., 2017)

3. การสลายตัวทางความร้อนของชีวมวล (thermo gravimetric analysis; TGA) เป็นการวัดความเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัสดุในแต่ละช่วงอุณหภูมิเมื่อได้รับความร้อน โดยน้ำหนักของชีวมวลที่เปลี่ยนแปลงจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเฉพาะของชีวมวลแต่ละชนิด น้ำหนักของชีวมวลที่หายไปนั้นเกิดจากการระเหย หรือการสลายตัว ณ อุณหภูมิที่แตกต่างกัน (คีต สร้อยทอง, ฉัตรเฉลิม แก้วชมภู, รังสินันท์ ณ รังษี และจารุวัตร เจริญสุข, 2562; Khok et al., 2020; Li et al., 2006)

4. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope; SEM) เป็นการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา หรือภาพถ่ายตัวอย่างที่อาศัยหลักการกราดลำอิเล็กตรอนไปบนผิวของตัวอย่าง แล้วนำสัญญาณที่ได้ไปสร้างเป็นภาพ โดยภาพที่ได้นั้นจะมีลักษณะเหมือน 3 มิติที่มีระยะชัด ลึก สูง จึงสามารถระบุลักษณะของตัวอย่าง ได้ชัดเจน (Guo, Xie, & Luo, 2014)

5. การวิเคราะห์สมบัติบริเวณพื้นผิวของวัสดุตัวอย่างด้วยเทคนิค x-ray photoelectron spectroscopy (XPS) โดยจะใช้แสงในย่านของ soft x-ray สำหรับการกระตุ้นเพื่อให้เกิดโฟโตอิเล็กตรอน และเน้นการวิเคราะห์ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนชั้นในสุด เนื่องจากเป็นค่าเฉพาะของอะตอมในแต่ละธาตุ และขึ้นกับสถานะทางเคมีของอะตอมนั้น ๆ จึงสามารถระบุชนิดและสถานะทางเคมีของธาตุที่เป็นองค์ประกอบบริเวณพื้นผิวของตัวอย่าง (Engelhard, Droubay, & Du 2016)

6. การวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน (surface area and porosity analyzer; BET) เป็นการวิเคราะห์คุณลักษณะพื้นที่ผิว สมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการวัดปริมาตรของแก๊สในโตรเจนในสภาวะสูญญากาศ ณ ความดันคงที่ ซึ่งสามารถใช้ได้กับตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นผงและชิ้นขนาดเล็ก (Sych et al., 2012)

7. การวิเคราะห์ฟังก์ชันบนพื้นผิวของวัสดุด้วยวิธี fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้ในการจำแนกประเภทของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และพันธะในโมเลกุล รวมถึงสามารถบอกปริมาณองค์ประกอบที่มีอยู่ภายในโมเลกุลของสารที่ทราบชนิด โดยทำการตรวจวัดการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของตัวอย่างที่ความถี่ต่าง ๆ ที่เป็นลักษณะเฉพาะตัวของแต่ละพันธะ วิธีการนี้สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งของแข็ง ของเหลว และแก๊ส (ศรัณย์ธรรม์ ภูริจารูยาง, 2559; Cole et al., 2019)

8. การวิเคราะห์ค่าศักย์ซีตา (Zeta Potential (ζ)) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้บอกถึงค่าความต่างศักย์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณพื้นผิวของอนุภาคตัวอย่างกับสารตัวอย่าง โดยค่าศักย์ซีตานั้นสามารถทำนายค่าความคงตัวของการกระจายตัวของอนุภาคตัวอย่างได้ ทั้งนี้ค่าศักย์ซีตาที่มีค่าเป็นบวกมากกว่า + 30 มิลลิโวลต์ หรือเป็นลบน้อยกว่า - 30 มิลลิโวลต์ จะส่งผลให้เกิดการหักล้างต่อการเกิดเสถียรภาพของการกระจายตัว แต่หากมีค่าศักย์ซีตาที่เป็นบวก หรือลบที่น้อยจะส่งผลให้ไม่มีแรงที่จะป้องกันอนุภาคอื่นเข้ามา จึงไม่เกิดเสถียรภาพการกระจายตัวทำให้เกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่ม (ปวีริสา เกตุขุญเฐียร, 2563; Fuseini et al., 2020; Ghorbel-Abid et al., 2016)

ลิพิด (ไขมันและน้ำมัน)

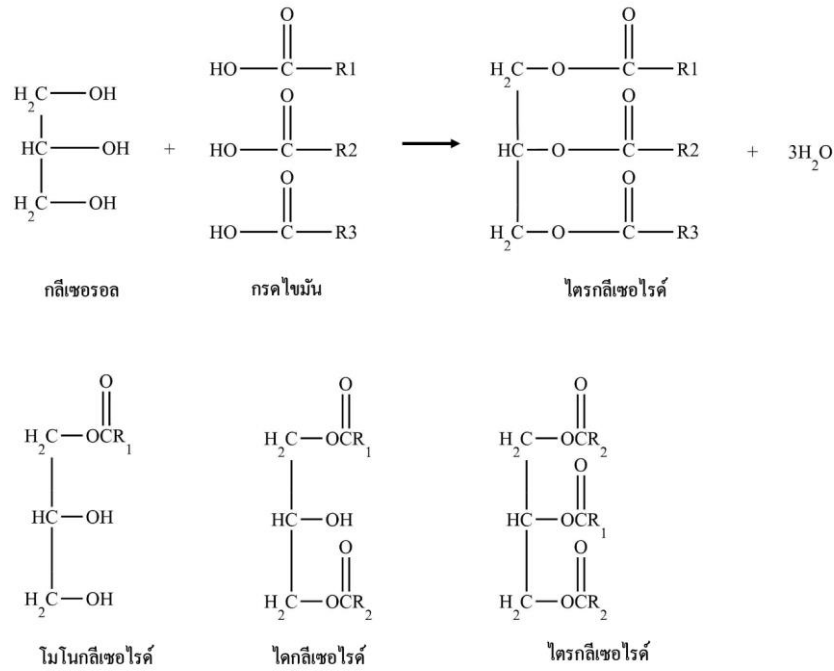
ไขมันและน้ำมันเป็นสารกลุ่มเดียวกัน หรืออาจเรียกว่า ลิพิด (lipid) ซึ่งสามารถพบได้ทั้งในพืช และสัตว์ โดยในพืชนั้นสามารถพบได้จากในส่วนของเมล็ด เช่น นุ่น ฟ้าย ปาล์ม ถั่วเหลือง เป็นต้น ส่วนในสัตว์นั้นจะเกิดการจากการสะสมไขมันในชั้นผิวหนัง หรือเนื้อเยื่อ ไขมันและน้ำมันจะมีชื่อเรียกอีกอย่างว่า ไตรกลีเซอไรด์ เนื่องจากมีกรดไขมัน (fatty acid) สาม โมเลกุลเชื่อมต่อกับกลีเซอรอล (glycerol; GL) ไขมันเป็นสารอินทรีย์ที่ไม่มีขั้วจึงไม่ละลายน้ำ แต่สามารถละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น อีเทอร์ เบนซีน คลอโรฟอร์ม เป็นต้น ไขมันและน้ำมันที่พบในธรรมชาติมักจะไม่มีอยู่ในสภาพอิสระ แต่จะอยู่กับสารชีวโมเลกุลอื่น ๆ (กุลธวัช เทพจันทร์, 2558; ชื่นสุขมณ ยิ้มถัน, สาโรจน์ ยิ้มถัน, เกรียงศักดิ์ ศรีวิจิตรกมล, อรุณี ชัยศรี, และวิษณุ แผงเมือง, 2559; Kulkarni & Dalai 2006; Waraho, McClements, & Decker 2011; Zhu et al., 2013)

ประเภทของลิพิด

ลิพิดแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ตามโครงสร้าง ดังนี้

1. ลิพิดอย่างง่าย (simple lipid) เป็นเอสเทอร์ของกรดไขมัน (fatty acids) และแอลกอฮอล์ชนิดต่าง ๆ ซึ่งยังแบ่งได้เป็น 2 ชนิด ไขมันและขี้ผึ้ง (Bhat, Nagasampagi & Meenakshi, 2009) มีรายละเอียดดังนี้

1.1. ไขมัน (fat) และน้ำมัน (oil) เป็นเอสเทอร์ของกรดไขมันกับกลีเซอรอล (glycerol) ในรูปของไตรเอซิลกลีเซอรอล (triacylglycerol) ซึ่งเป็นแอลกอฮอล์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล 3 หมู่ ถ้ามีกรดไขมันเพียง 1 โมเลกุลรวมตัวกับกลีเซอรอลเรียกว่า มอโนกลีเซอไรด์ ถ้ามีกรดไขมัน 2 และ 3 โมเลกุล รวมตัวกับกลีเซอรอลเรียกว่า ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ ตามลำดับ ถ้ามีสถานะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้องเรียกว่า ไขมัน แต่ถ้าเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้องเรียกว่า น้ำมัน เช่น น้ำมันที่ได้จากพืช และสัตว์ทั่วไป แสดงดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 โครงสร้างของกรดไขมัน

ที่มา : Bhat, Nagasampagi & Meenakshi, 2009

1.2. ขี้ผึ้ง (waxes) เป็นเอสเทอร์ของกรดไขมันกับแอลกอฮอล์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ที่ไม่ใช่กลีเซอรอล และมีหมู่ไฮดรอกซิลเพียงหมู่เดียว เป็นสารที่ไม่ละลายน้ำ มีลักษณะแข็งเมื่อเย็นและจะอ่อนตัวเมื่อได้รับความร้อน ซึ่งได้จากรังของผึ้ง และผลพลอยได้จากการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม

2. ลิพิดเชิงประกอบ (compound lipid) คือ ลิพิดที่เป็นเอสเทอร์ของกรดไขมันและกลีเซอรอลและมีสารอื่นรวมอยู่ด้วย จึงจำแนกเป็นชนิดต่าง ๆ แบ่งออกเป็น 3 ชนิดใหญ่ๆ ได้แก่

2.1. ฟอสโฟลิพิด (phospholipids) ประกอบด้วย กรดไขมัน แอลกอฮอล์ และกรดฟอสฟอริก บางครั้งอาจจะพบเบสที่มี ไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบรวมอยู่ด้วยก็ได้ เช่น กลีเซอโรฟอสโฟลิพิด (glycerophospholipids) และ สฟิงโกฟอสโฟลิพิด (sphingophospholipids)

2.2. ไกลโคลิพิด (glycolipids) เป็นลิพิดที่ประกอบด้วยกรดไขมัน สฟิงโกไลซัน และคาร์โบไฮเดรต

2.3. ลิพิดเชิงประกอบชนิดอื่นๆ เช่น ลิโปโปรตีน (lipoproteins) เป็นสารประกอบเชิงซ้อนของลิพิดและโปรตีน หรือ ซัลโฟลิพิด (sulfolipids) เป็นสารประกอบเชิงซ้อนของลิพิดและซัลเฟอร์ เป็นต้น

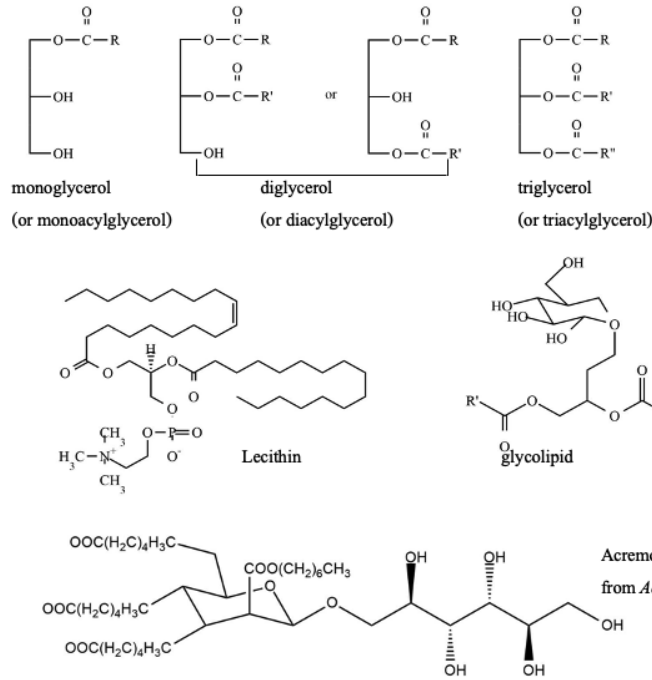
3. อนุพันธ์ลิพิด (derived lipids) เป็นสารประกอบลิพิดอื่น ๆ ที่ไม่อยู่ในสองกลุ่มแรก เช่น กรดไขมัน โมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และโคเลสเตอรอล เป็นต้น ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายของลิพิดอย่างง่าย หรือลิพิดเชิงประกอบที่ยังคงมีสมบัติของลิพิดอยู่

โครงสร้างของไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride)

กลีเซอไรด์ (glyceride) หรือแอซิลกลีเซอรอล (acylglycerol) โดยส่วนมากจะพบในน้ำมันพืช และไขมันสัตว์ ซึ่งจัดเป็นสารอินทรีย์ประเภทเอสเทอร์ระหว่างกลีเซอรอลและกรดไขมัน สามารถจำแนกโครงสร้างของกรดไขมันได้ 3 ชนิด (Tsutsui et al., 2013) ดังนี้

1. กรดไขมัน 1 โมเลกุล หรือพันธะเอสเทอร์ 1 พันธะ เรียกว่า โมโนกลีเซอไรด์ (monoglyceride; MG)
2. กรดไขมัน 2 โมเลกุล หรือพันธะเอสเทอร์ 2 พันธะ เรียกว่า ไดกลีเซอไรด์ (diglyceride; DG)
3. กรดไขมัน 3 โมเลกุล หรือพันธะเอสเทอร์ 3 พันธะ เรียกว่า ไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride; TG)

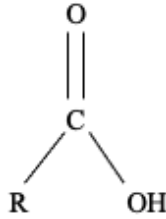
โดยส่วนใหญ่ในธรรมชาติจะพบในรูปของไตรกลีเซอไรด์ อีกทั้งหมู่ไฮดรอกซิลทั้ง 3 หมู่ของกลีเซอรอลจะเกิดพันธะเอสเทอร์กับกรดไขมันหลายชนิดซึ่งเรียกว่า กลีเซอไรด์เชิงผสม (mixed glyceride) มากกว่าเกิดพันธะเอสเทอร์กับกรดไขมันชนิดเดียวที่เรียกว่า กลีเซอไรด์เชิงเดี่ยว (simple glyceride) นอกจากนี้ ยังอาจพบกลีเซอไรด์เกิดพันธะกับสารอื่นที่ไม่ใช่กรดไขมัน ได้แก่ หมู่ฟอสเฟตที่เรียกว่า ฟอสโฟลิพิด หรือฟอสโฟกลีเซอไรด์ (phosphoglyceride) เช่น เลซิธิน (lecithin) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกระทำอิมัลชัน (emulsifier) และสารกันหืน หรือเกิดพันธะกับคาร์โบไฮเดรต เรียกว่า ไกลโคลิพิด เช่น อะครีโมแมนโนลิพินเอ (acremomannolipin a) โดยสามารถแยกได้จากรากฤๅษะอะครีโมเนียม (acremonium strictum) เป็นต้น แสดงดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 กลิเซอไรด์ และลิพิดต่าง ๆ
ที่มา : Bhat, Nagasampagi & Meenakshi, 2009

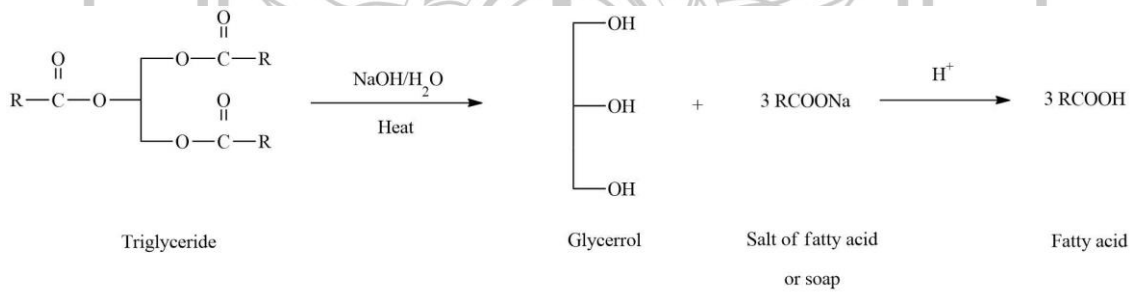
กรดไขมัน

กรดไขมันเป็นกรดอินทรีย์ชนิดหนึ่งมีลักษณะเป็นโมเลกุลเกิดจากอะตอมของธาตุคาร์บอน (C) และไฮโดรเจน (H) เชื่อมต่อกันเป็นสายโซ่ยาว โดยมีปลายด้านหนึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชัน -COOH (carboxyl group) แสดงดังภาพที่ 2.6 ซึ่งแสดงถึงโครงสร้างโมเลกุลของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล โดยสัญลักษณ์ R แสดงถึงหมู่ไฮโดรคาร์บอน คือ ส่วนที่เป็นสายโซ่ที่เกิดจากอะตอมของธาตุคาร์บอนกับไฮโดรเจนมาเชื่อมต่อกัน ซึ่งส่วนที่เป็นหมู่ไฮโดรคาร์บอนนี้เป็นส่วนที่ทำให้เกิดเป็นกรดไขมัน มีสมบัติต่างกัน (Mapato, Wanapat & Cherdthong, 2010)



ภาพที่ 2.6 หมู่คาร์บอกซิล
ที่มา : Bhat, Nagasampagi & Meenakshi, 2009

สัตว์และพืชชั้นสูงส่วนใหญ่จะพบกรดปาล์มิติก (palmitic acid) กรดสเตียริก (stearic acid) กรดลิโนเลอิก (linoleic acid) และกรดโอเลอิก (oleic acid) และจะพบกรดไขมันอิสระ (free fatty acid) ในรูปของไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) หรือเป็นลิพิดเชิงซ้อน เมื่อไตรกลีเซอไรด์ ถูกแยกสลายด้วยน้ำในสภาวะเบสหรือด่างจะเกิดเกลือของกรดไขมัน (salt of fatty acid) หรือสบู่ และกลีเซอรอล (glycerol) จากนั้นปรับสภาวะละลายให้มีสภาวะเป็นกรด และจะได้กรดไขมัน (Mapato, Wanapat & Cherdthong, 2010) แสดงดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 การแยกสลายตัวด้วยน้ำของไตรกลีเซอไรด์
ที่มา : Bhat, Nagasampagi & Meenakshi (2009)

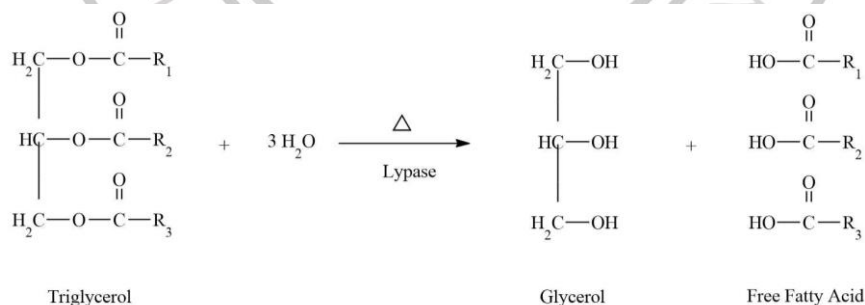
กรดไขมันสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. กรดไขมันอิ่มตัว (saturated fatty acid) มีโครงสร้างเป็นพันธะเดี่ยวทั้งหมด มีจำนวนอะตอมของคาร์บอนตั้งแต่ 10 อะตอมขึ้นไป และมีจุดหลอมเหลวสูงกว่าอุณหภูมิห้อง สามารถแข็งตัวได้ง่าย ไม่เหม็นหืน เนื่องจากไม่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ ได้แก่ กรดสเตียริก กรดปาล์มมิติก เป็นต้น โดยกรดไขมันอิ่มตัวเป็นกรดไขมันที่พบในสัตว์มากกว่าพืช ส่วนพืชที่มีกรดไขมันอิ่มตัว เช่น น้ำมันปาล์มและน้ำมันมะพร้าว (กุลธวัช เทพจันทร์, 2558; ชื่นสุมณ อิ่มถิ่น, สาโรจน์ อิ่มถิ่น, เกரியงศักดิ์ ศรีวิจิตรกมล, อรุณี ชัยศรี, และวิษณุ แผงเมือง, 2559; Mapato, Wanapat & Cherdthong, 2010)

2. กรดไขมันไม่อิ่มตัว (unsaturated fatty acid) มีโครงสร้างเป็นพันธะคู่ตั้งแต่ 1-5 พันธะ โดยจะมีพันธะคู่อยู่ระหว่างคาร์บอนอะตอมในโมเลกุลบางตำแหน่ง ทำให้สามารถเติมไฮโดรเจนเข้าไปในโมเลกุลของกรดไขมันไม่อิ่มตัวได้อีก เช่น กรดลิโนเลอิก และกรดโอเลอิก เป็นต้น (กุลธวัช เทพจันทร์, 2558; ชื่นสุมณ อิ่มถิ่น, สาโรจน์ อิ่มถิ่น, เกரியงศักดิ์ ศรีวิจิตรกมล, อรุณี ชัยศรี, และวิษณุ แผงเมือง, 2559; Mapato, Wanapat & Cherdthong, 2010)

กรดไขมันอิสระ

กรดไขมันอิสระ (free fatty acid; FFA) หมายถึง กรดไขมันที่ไม่ได้รวมอยู่ในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ โดยทั่วไปกรดไขมันซึ่งเป็นลิพิดมักจะพบอยู่ในน้ำมันและไขมันจะรวมกันอยู่ในรูปของไตรกลีเซอไรด์ ซึ่งหากแยกออกมาจะอยู่ในรูปของไขมันอิสระ กรดไขมันอิสระเกิดจากไตรกลีเซอไรด์ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ไลเปสซึ่งมีน้ำเป็นส่วนร่วมในปฏิกิริยา หรือที่เรียกว่า hydrolytic rancidity แสดงดังภาพที่ 2.8 (ภัทรติกรณ์ รัศมีศักดิ์ศรี, 2555; กุลธวัช เทพจันทร์, 2558; ชื่นสุมณ อิ่มถิ่น, สาโรจน์ อิ่มถิ่น, เกரியงศักดิ์ ศรีวิจิตรกมล, อรุณี ชัยศรี, และวิษณุ แผงเมือง, 2559; Mapato, Wanapat & Cherdthong, 2010)



ภาพที่ 2.8 การเกิดกรดไขมันอิสระ (free fatty acid)

ที่มา : Bhat, Nagasampagi & Meenakshi, 2009

สำหรับกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชใช้แล้ว เกิดขึ้นจากน้ำมันพืชผ่านการใช้งานที่ได้รับความร้อน ส่งผลให้ตำแหน่งของไฮโดรเจนในโมเลกุลเปลี่ยนสภาพเป็นกรดได้ง่าย และมีค่าความเป็นกรดสูงขึ้น หรือที่เรียกว่า ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาการย่อยสลายพันธะเอสเทอร์ในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ด้วยน้ำ ทำให้เกิดกรดไขมันอิสระไม่ทำปฏิกิริยาหรือเชื่อมต่อกับโมเลกุลอื่น (กมลวรรณ สุขสวัสดิ์, 2559; ศศิกานต์ ปานปราณีเจริญ, 2561; Ali & El Anany, 2014)

กระบวนการกำจัดกรดไขมันอิสระ (neutralizing)

น้ำมันที่มีกรดไขมันอิสระส่งผลให้มีกลิ่นเหม็นหืน เมื่อถูกความร้อนจะเกิดควันมากทำให้น้ำมันเสื่อมคุณภาพเร็ว และมีสีคล้ำเพราะกรดไขมันอิสระทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศได้ง่าย กลิ่นเหม็นหืนที่เกิดขึ้นนั้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณของกรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในน้ำมัน กรณีมีกรดไขมันอิสระอยู่มากจะเกิดการเหม็นหืนอย่างรวดเร็ว จึงจำเป็นต้องกำจัดออก (กาญจนา ลากยงยศ, 2543; อนุวัฒน์ ยอดอรัญ, 2552) ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลนั้นหากมีปริมาณกรดไขมันอิสระสูงจะไปยับยั้งการเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์ที่จะเป็นไบโอดีเซล ทำให้ได้ผลผลิตไบโอดีเซลลดลง ไบโอดีเซลที่ได้จะเกิดการกัดกร่อนเครื่องยนต์ และลดเสถียรภาพการออกซิเดชัน (กรมพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2554) โดยวิธีการกำจัดไขมันอิสระในน้ำมันพืช สามารถอธิบายได้ดังนี้

ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน (tranesterification)

ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมัน โดยการใช้สารละลายด่าง ซึ่งเป็นที่นิยมในโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากสามารถลดปริมาณกรดไขมันได้มาก และเกิดผลพลอยได้เป็นสบู่ เหมาะแก่้น้ำมันสารตั้งต้นที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระต่ำ เช่น งานวิจัยของ ศศิกานต์ ปานปราณีเจริญ (2561) ที่ได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่ามีปริมาณกรดไขมันอิสระลดลงจากเดิมร้อยละ 0.75 เป็นร้อยละ 0.46 และปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลสูงถึงร้อยละ 91.04

ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (esterification)

ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมัน โดยการใช้สารละลายกรด ซึ่งเหมาะสมกับการลดกรดไขมันอิสระที่มีค่าสูง แต่มีข้อจำกัดในเรื่องของอุปกรณ์ที่ใช้ที่ต้องมีความสามารถทนทานต่อการกัดกร่อนของสารเคมี วิธีการนี้จึงนิยมใช้ในงานปฏิบัติการหรือโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ซึ่งโดยด้วยใหญ่จะเป็นการลดกรดไขมันอิสระในขั้นต้น และทำการผลิตไบโอดีเซลในขั้นตอนต่อไป เช่น งานวิจัยของ Moradi และคณะ (2015) ที่ได้ศึกษาการ

ผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้ว โดยใช้กรดซัลฟูริกเพื่อลดกรดไขมันในน้ำมันสารตั้งต้นและนำไปผลิตไบโอดีเซล พบว่าการใช้กรดซัลฟูริกทำให้มีกรดไขมันลดลงเหลือร้อยละ 0.49 และเมื่อนำไปผลิตไบโอดีเซลจะได้ผลผลิตสูงถึงร้อยละ 83

การดูดซับ (adsorption)

การใช้วัสดุดูดซับเป็นการดึงโมเลกุลของสารเข้ามาติดที่พื้นผิวของตัวดูดซับ สารที่เกิดการดูดซับที่พื้นผิวเรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbent) ส่วนสารที่ถูกดูดซับเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ปัจจุบันวิธีการดูดซับเป็นวิธีหนึ่งที่มีความนิยม เนื่องจากวัสดุดูดซับนั้นหาซื้อได้ง่าย มีราคาถูก เช่น ซีโอไลต์ หรือสามารถเตรียมได้จากวัสดุเหลือทิ้งทางธรรมชาติ เช่น ถ่านกัมมันต์ และถ่านชีวภาพ เป็นต้น เช่น งานวิจัยของภาคภูมิ จตุพรสวัสดิ์ และคณะ (2554) ที่มีการศึกษาการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบ โดยใช้ถ่านแฉกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 3 โมลาร์ พบว่าถ่านแฉกรดไฮโดรคลอริกและเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส มีค่าการดูดซับสูงกว่าถ่านแฉกรดที่เผาอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เนื่องจากการเผาที่อุณหภูมิสูงเกินไปส่งผลให้พื้นที่ผิวและองค์ประกอบของตัวดูดซับโดนทำลาย จึงมีค่าการดูดซับกรดไขมันอิสระลดลง และงานวิจัยของ Rahayu, Supriyatin & Bintari (2018) ที่ศึกษาการใช้ถ่านกัมมันต์จากกากสับปะรด ชานอ้อย และกาบมะพร้าวในการลดจำนวนกรดไขมันอิสระ (ffa) จากน้ำมันพืชใช้แล้ว พบว่า ถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยที่ผ่านการเผาด้วยอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส นาน 120 นาที และกระตุ้นด้วยสารเคมีเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เป็นวัสดุที่สามารถดูดซับกรดไขมันอิสระจากน้ำมันพืชใช้แล้วได้ดีที่สุด

การวิเคราะห์ความเป็นกรดของไขมันและน้ำมัน

การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของน้ำมันนั้นเป็นการวิเคราะห์ทางเคมี ซึ่งมีวิธีที่นิยมใช้โดยทั่วไปดังนี้

1. วิธีไทเทรชัน (titration) เป็นวิธีหาปริมาณสาร โดยการใช้สารละลายมาตรฐานที่ทราบค่าความเข้มข้นแน่นอน โดยอาศัยหลักการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารละลายที่เข้าทำปฏิกิริยากันพอดี และทำการคำนวณหาปริมาณสารตัวอย่างต่อไป ในการไทเทรชันกรดไขมันอิสระ โดยทั่วไปจะใช้สารละลายประเภทต่าง ได้แก่ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Ayu et al., 2018; Díaz & Brito, 2016; Khuzaimah & Eralita, 2020)

2. วิธี thin layer chromatography (TLC) เป็นวิธีการแยกสารที่ผสมกันอยู่ โดยอาศัยหลักการของสารต่างชนิดกันกระจายตัวอยู่ในวัฏภาคหนึ่ง หรือตัวดูดซับและวัฏภาคเคลื่อนที่ สารต่างชนิดกันจึงเดินทางผ่านวัฏภาคหนึ่งออกมาที่วัฏภาคเคลื่อนที่ที่ได้ไม่พร้อมกัน จึงเกิดการแยกชั้น วิธีการนี้เป็นการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารที่รวดเร็ว สะดวก ราคาไม่แพง นิยมใช้เพื่อตรวจสอบความบริสุทธิ์ของสารระหว่างกระบวนการแยกสารในขั้นตอนต่าง ๆ รวมถึงสามารถยืนยันชนิดของสารและองค์ประกอบภายในสารได้ (กำพล ประทีปชัยกูร, กฤษ สมนึก และนฤมล อินทร์ดี, 2557; วรณิศา กลิ่นจันทร์, 2558; สายฝน เกียวสัมพันธ์, 2563)

3. วิธี gas chromatography-flame ionization detector (GC-FID) เป็นเทคนิคสำหรับการแยกสารตัวอย่างที่เป็นสารผสม โดยจะใช้หลักการเปลี่ยนสารผสมให้กลายเป็นไอที่อุณหภูมิหนึ่งแล้วนำไอของสารนั้นเข้าไปยังคอลัมน์ที่มีเฟสคงที่ ซึ่งอาศัยการพาไปของเฟสเคลื่อนที่ องค์ประกอบของสารผสมจะเกิดการแยกออกจากกันเมื่อเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์และจะถูกตรวจวัดโดย detector และถูกบันทึกผลแสดงออกมาในรูปแบบของ Chromatogram (วุฒิชัย รสชาติ, 2560)

4. วิธี fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) เป็นเทคนิคที่ใช้จำแนกประเภทของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และพันธะเคมี หมู่ฟังก์ชันใน โมเลกุล รวมถึงสามารถบอกถึงปริมาณขององค์ประกอบที่มีอยู่ภายใน โมเลกุลของสาร โดยการใช้หลักการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่แตกต่างกันของสารแต่ละชนิด (ศรัณย์ธรรม ภูริจารูยาง, 2559; Cole et al., 2019)

กระบวนการดูดซับ

การดูดซับ คือ กระบวนการดึงโมเลกุลของสารเข้ามาติดยังผิวของตัวดูดซับที่เกิดขึ้นระหว่างเฟส 2 เฟส โดยจะเกิดขึ้นที่พื้นผิวสัมผัส (interface) ซึ่งเป็นพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของเหลวกับของเหลว ของเหลวกับแก๊ส ของแข็งกับแก๊ส และของแข็งกับของเหลว สารที่เกิดการดูดซับที่พื้นที่ผิวเรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbent) ส่วนสารที่ถูกดูดซับเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) โดยปริมาณตัวดูดซับขึ้นอยู่กับอุณหภูมิสัมบูรณ์ ความดัน และพลังงานศักย์ของอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นในการดูดซับอาจเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ หรือแรงที่อยู่ในรูปของพันธะเคมี (ลลิตา แสงอาทิตย์, 2554; วิไลวรรณ แผงสุภา, 2557; เสาวภา ไวยสุศรี, 2558; อติศักดิ์ คีรีรักษ์, 2561; Abdullah & Choudhary, 2017)

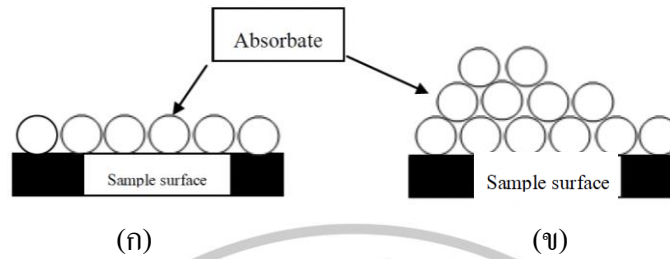
ประเภทการดูดซับของสาร

กระบวนการดูดซับเกิดขึ้นด้วยแรงระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ โดยจำแนกแรงดังกล่าวออกเป็น 2 ชนิด คือ แรงกายภาพและแรงเคมี ซึ่งโดยกระบวนการดูดซับแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption) และดูดซับทางกายภาพ

(physical adsorption) ตามชนิดของแรงที่ดูดจับ โมเลกุลของสารถูกดูดซับไว้บนผิวของตัวดูดซับ (วิมลมาศ ศิริวานิชย์, 2558; เสาวภา ไวยสุศรี, 2558; อติศักดิ์ ศิริรักษ์, 2561)

1. การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption) เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นระหว่างตัวถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ โดยเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้น ซึ่งตัวถูกดูดซับเกิดการเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้มีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิม แล้วมีการจัดเรียงอะตอมใหม่เป็นสารประกอบขึ้นมาใหม่ พันธะระหว่างอะตอมมักจะแข็งแรง ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูง ค่าความร้อนในการดูดซับประมาณ 50 - 400 kJ/mol การดูดซับแบบนี้เป็นแบบเฉพาะเจาะจง พันธะทางเคมีที่เกิดขึ้นเป็นแรงยึดเหนี่ยวที่มีความแข็งแรง จึงทำให้การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากวัสดุดูดซับทำได้ยากหรือนำกลับมาใช้ใหม่ได้ยาก เพราะองค์ประกอบที่ถูกดูดซับมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมี และการดูดซับจะเป็นแบบชั้นเดียว (monolayer) แสดงดังภาพที่ 2.9 (ก) เนื่องจากการดูดซับโดยปฏิกิริยาทางเคมีจะไม่สามารถเกิดการคายซับได้ พบว่าสารประกอบบางชนิดที่อุณหภูมิปกติไม่เกิดการดูดซับทางเคมี แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิก็สามารถเกิดการดูดซับทางเคมีได้ (กุลธิดา สะอาด, 2557; Chueasupcharoen, 2018) เช่น งานวิจัยของ Chairgulprasert & Madlah (2018) ที่มีการศึกษาเกี่ยวกับกากกาแฟเพื่อใช้ในการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มใช้แล้ว พบว่าการดูดซับทางเคมีในช่วง 80-200 kJ/mol การเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปียังเป็นค่าลบซึ่งสอดคล้องกับการลดระดับความเป็นกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มใช้แล้ว

2. การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) เป็นการดูดซับด้วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน ๆ และเป็นแรงที่ไม่กำหนดทิศทาง เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals) หรือพันธะไฮโดรเจน ซึ่งมีทิศทางโดยไม่มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้อง ความร้อนของการดูดซับมีค่าน้อย การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากตัวดูดซับจะทำได้ง่ายและการดูดซับอาจเกิดซ้อนกันหลายชั้น (multilayer) โดยการดูดซับชนิดนี้สามารถเกิดได้ที่อุณหภูมิปกติและจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วทันทีที่โมเลกุลเคลื่อนที่มาสัมผัสบริเวณผิวหน้าตัวดูดซับ ทั้งนี้เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิหรือเพิ่มความดันจะทำให้ความสามารถของการดูดซับลดลง เนื่องมาจากตัวถูกดูดซับจะเคลื่อนที่ออกจากตัวดูดซับ ซึ่งเป็นการนำตัวดูดซับที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง (กุลธิดา สะอาด, 2557; Chueasupcharoen, 2018) แสดงดังภาพที่ 2.9 (ข) เช่น งานวิจัยของ Ayu et al. (2018) ที่มีการศึกษาการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปรุงอาหารด้วยซีโอไลต์ พบว่า ซีโอไลต์ที่กระตุ้นด้วยด่างจะดูดซับกรดไขมันอิสระได้ดีกว่าการกระตุ้นด้วยกรด ซึ่งแสดงถึงพื้นที่ผิวของตัวดูดซับที่ไม่ชอบน้ำสามารถใช้เป็นวัสดุดูดซับได้



ภาพที่ 2.9 แสดงการดูดซับแบบชั้นเดียว และการดูดซับแบบหลายชั้น

(ก) การดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption)

(ข) การดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer adsorption)

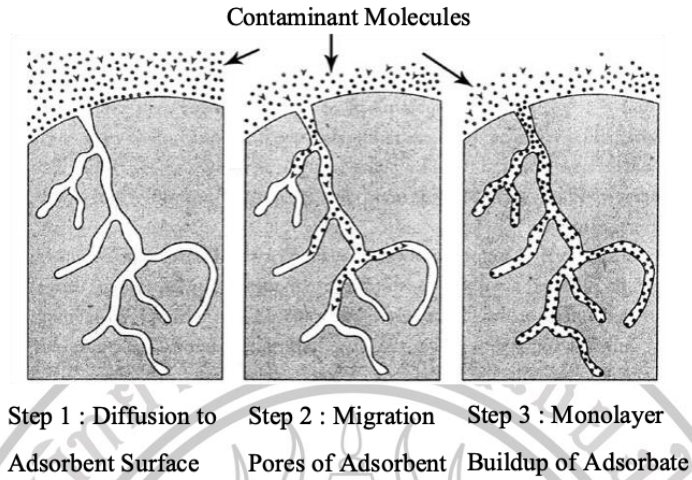
ที่มา : อติศักดิ์ ศิริรักษ์, 2561

กลไกการดูด

การดูดซับ เป็นกลไกสำคัญที่ทำให้สารแขวนลอยสามารถเกาะจับอยู่บนสารกรองหรือบนสิ่งอื่นที่จับบนสารกรองอยู่ก่อนแล้ว คอลลอยด์และสารกรองมักจะมีประจุลบ ทั้งคู่มีความสามารถในการดูดซับขึ้นอยู่กับชนิดของสารที่ทำหน้าที่ดูดซับ สารที่นิยมใช้กัน ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ เป็นต้น ขั้นตอนที่เกิดขึ้นในการดูดซับมี 4 ขั้นตอน (พัชรินทร์ โสระสิงห์, 2562; วิมลมาศ ศิริวาณิชย์, 2558; เสาวภา ไวยสุศรี, 2558; อติศักดิ์ ศิริรักษ์, 2561) ดังนี้

1. การเคลื่อนที่ของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าหาคาร์บอนหรือตัวดูดซับ ในกรณีของคาร์บอนแบบผง การเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการกวนสารจนทำให้เกิดความปั่นป่วน แต่ในกรณีของคาร์บอนแบบเกล็ดการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นมีกลไกเช่นเดียวกับที่เกิดขึ้นในเครื่องกรองน้ำ

2. การแพร่ในชั้นฟิล์ม (film diffusion) เมื่อโมเลกุลของตัวถูกละลายเข้ามาถึงคาร์บอน ซึ่งตามปกติมีฟิล์มห่อหุ้มอยู่โดยรอบ ๆ คล้ายเยื่อบาง ๆ โมเลกุลต้องแทรกผ่านฟิล์มให้ได้ จึงจะเข้าผิวคาร์บอนได้ แสดงดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 กลไกการดูดซับสารปนเปื้อนบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับที่มีรูพรุน
ที่มา : สโรชา เฟิงศรี, 2555

3. การแพร่ในรูพรุน (pore diffusion) เนื่องจากคาร์บอนมีพื้นที่ส่วนใหญ่อยู่ที่โพรงหรือช่องว่างภายใน โมเลกุลของตัวถูกละลาย จึงต้องแทรกตัวเข้าไปถึงช่องว่างภายในคาร์บอนจึงจะมีการดูดติดผิวเกิดขึ้น

4. โมเลกุลต้องเกาะติดบนผิวคาร์บอนโดยไม่หลุดออกจากผิวคาร์บอน

ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ลักษณะของตัวดูดซับและตัวถูกละลาย (สโรชา เฟิงศรี, 2555; Radhika & Palanivelu, 2006)

1. ลักษณะของตัวดูดซับ

1.1. พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน พื้นที่ผิวเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับในการดูดซับ กล่าวคือ เมื่อพื้นที่ผิวของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับมากขึ้นความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น แต่พื้นที่ผิวโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับแค่เพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอที่จะอธิบายความสามารถในการดูดซับได้ดี โครงสร้างของรูพรุนก็มีผลต่อความสามารถในการดูดซับด้วยเช่นกัน

1.2. ขนาดของตัวดูดซับ อัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดตัวดูดซับ ถ้าขนาดของตัวดูดซับมีขนาดเล็กจะทำให้มีความสามารถในการดูดซับที่เร็วกว่าตัวดูดซับที่มีขนาดใหญ่ นอกจากนี้ขนาดโมเลกุลของสารถูกดูดซับก็มีผลเช่นกัน คือ ถ้าขนาดของโมเลกุลของสารถูกดูดซับไม่สามารถเข้าไปในรูพรุนของโมเลกุลตัวดูดซับได้ จะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลงด้วย

1.3. เคมีที่ผิวหน้า หมู่ฟังก์ชันเฉพาะบนผิวของตัวดูดซับ มีผลต่อกระบวนการดูดซับ เช่น ถ้าโมเลกุลตัวดูดซับเป็นพวกออกไซด์และมีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรด ความสามารถในการดูดซับจะลดลง แต่ถ้าหากมีหมู่ฟังก์ชันเป็นหมู่คาร์บอนิล ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น

2. ลักษณะของตัวถูกดูดซับ

2.1. ความสามารถในการละลายของตัวถูกดูดซับ ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายเป็นปัจจัยสำคัญในการดูดซับ การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของสารถูกดูดซับในตัวทำละลายลดลง เนื่องจากในการดูดซับสารถูกดูดซับจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลายคือ น้ำ โดยสารถูกดูดซับที่ละลายน้ำได้ดีหรือแตกตัวเป็นไอออนได้ดีจะมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำสูงจึงเป็นการยากในการดูดซับ ดังนั้น สารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อยจะสามารถถูกดูดซับได้ดี นอกจากความสามารถในการละลายแล้ว ขนาดของโมเลกุลของสารถูกดูดซับยังมีความสัมพันธ์กับการดูดซับ ซึ่งถ้าอัตราการเคลื่อนที่ภายในโพรงเป็นอัตราที่ควบคุมกลไกแล้ว ความสามารถในการดูดซับจะแปรผกผันกับขนาดของโมเลกุลของตัวละลาย

2.2. น้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุล เมื่อน้ำหนักของโมเลกุลและขนาดของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เช่น ตัวถูกดูดซับเป็นสารอินทรีย์ ถ้าจำนวนอะตอมคาร์บอนมากขึ้น การดูดซับจะเกิดมากขึ้น เพราะการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลจะทำให้ความสามารถในการละลายลดลง

2.3. ความมีขั้ว (polarity) ความมีขั้วของตัวถูกดูดซับ นอกจากลักษณะของตัวถูกดูดซับแล้วยังขึ้นอยู่กับตัวทำละลายและตัวดูดซับด้วย โดยเมื่อความมีขั้วเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะลดลง เพราะความมีขั้วที่สูงขึ้นทำให้ความสามารถในการละลายมากขึ้น

2.4. ผลของ $[H^+]$ หรือ ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ถ้า $[H^+]$ ลดลง อัตราการดูดซับจะมากและเร็ว เพราะเมื่อ $[H^+]$ เพิ่มขึ้นทำให้สามารถเกาะติดผิวคาร์บอนได้ดี จะทำให้คาร์บอนมีสภาพเป็นกลางเสมอ เนื่องจากคาร์บอนไม่มีขั้ว ค่อนข้างมีประจุเล็กน้อย จึงทำให้สารไม่มีขั้ว (non polarity) ในน้ำเกาะที่ผิวคาร์บอนได้ดี ซึ่ง pH มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ

2.5. ผลของอุณหภูมิ การดูดติดผิวโดยทั่วไปจะเป็นกระบวนการคายความร้อน (exothermic) ส่งผลให้ความสามารถในการดูดติดผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อลดอุณหภูมิ แต่อัตราเร็วในการดูดติดผิวจะลดลง ในทางตรงกันข้ามเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการดูดติดผิวจะลดลง แต่อัตราเร็วในการดูดติดผิวจะสูงขึ้น นอกจากนี้อุณหภูมียังมีผลต่อความสามารถในการดูดติดผิว โดยจะเปลี่ยนความสามารถในการละลาย เช่น เมื่ออุณหภูมิซึ่งโดยปกติจะทำให้ความสามารถในการละลายสูงขึ้น มีผลทำให้ความสามารถในการดูดติดผิวลดลง

2.6. ความดันป่วน อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับ การแพร่ผ่านชั้นฟิล์มของน้ำ (film diffusion) และการแพร่สู่ช่องว่างหรือโพรง (pore diffusion) ซึ่งแล้วแต่ความดันป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความดันป่วนต่ำชั้นฟิล์มน้ำที่ล้อมรอบสารดูดซับมีความหนามาก ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับเข้าไปหาตัวดูดซับทำให้ชั้นฟิล์มของน้ำเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมีความดันป่วนสูงทำให้การแพร่สู่ช่องว่างหรือโพรงบางลงเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วการดูดซับ ทำให้อัตราการดูดซับเร็วขึ้น

สมดุลการดูดซับ

เมื่อการดูดซับเกิดขึ้น วัฏภาคดูดซับ (adsorbed phase) เกิดขึ้นบนผิวของตัวดูดซับ สารถูกดูดซับที่อยู่ในวัฏภาคของไหล (fluid phase) ซึ่งมีสถานะเป็นแก๊สหรือของเหลวที่เคลื่อนไหวได้ อย่างอิสระจะถ่ายโอนไปยังวัฏภาคดูดซับ ณ สภาวะที่ควบคุมไว้ เมื่ออัตราการถ่ายโอนสารถูกดูดซับจากวัฏภาคของไหลไปยังวัฏภาคดูดซับเท่ากับอัตราการถ่ายโอนสารถูกดูดซับจากวัฏภาคดูดซับไปยังวัฏภาคของไหล นั่นคืออัตราการดูดซับสุทธิเป็นศูนย์ ดังนั้นการดูดซับสารถูกดูดซับดังกล่าว จึงเข้าสู่สมดุล (equilibrium) สมดุลดูดซับ (adsorption equilibrium) จึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อกระบวนการดูดซับ ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบกระบวนการแยกสารทางอุตสาหกรรมได้ (สโรชา เฟิงศรี, 2555; อติศักดิ์ คีรีรักษ์, 2561; Somsesta, Sricharoenchaikul & Aht-Ong, 2020) สมดุลการดูดซับสามารถหาได้จากสมการที่ 2.5

สมการ

$$q = \frac{C_0 - C_e}{W} \times V \quad (2.5)$$

| | |
|-----------|--|
| เมื่อ q | คือ ความสามารถในการดูดซับ (mg/g) |
| C_0 | คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดไขมันอิสระในน้ำมัน (mg/L) |
| C_e | คือ ความเข้มข้นที่จุดสมดุลของกรดไขมันอิสระหลังการดูดซับ (mg/L) |
| V | คือ ปริมาตรของน้ำมัน (mL) |
| W | คือ น้ำหนักของถ่านดูดซับ (mg) |

สมดุลดูดซับแปรตามชนิดของตัวดูดซับ ชนิดของสารถูกดูดซับ ความเข้มข้นหรือความดันของสารถูกดูดซับ และอุณหภูมิ สมดุลดูดซับจำเพาะของสารถูกดูดซับชนิดใด ๆ ด้วย ตัวดูดซับชนิดหนึ่งที่กำหนดไว้ นั้นเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับ (q) กับความเข้มข้นสมดุล (C) หรือความดันสมดุล (P) และอุณหภูมิสมดุล (T) แบบจำลองการดูดซับจึงจำแนกออกเป็น 3 ประเภท ตามชนิดของตัวแปรที่ควบคุมให้คงที่ (สโรชา เฟิงศรี, 2555; อดิศักดิ์ คีร์รักันย์, 2561; Fitri et al., 2019) ดังนี้

1. แบบจำลองสมดุลดูดซับอุณหภูมิคงที่ (adsorption isotherm) เป็นแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับกับความดันสมดุลของแก๊สหรือไอของสารถูกดูดซับ หรือความเข้มข้นสมดุลของสารถูกดูดซับ ในของเหลว ณ อุณหภูมิที่กำหนด
2. แบบจำลองสมดุลดูดซับความดันคงที่ (adsorption isobar) หรือความเข้มข้นคงที่ เป็นแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับกับอุณหภูมิสมดุล
3. แบบจำลองสมดุลดูดซับความสามารถในการดูดซับคงที่ (adsorption isostere) เป็นแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันสมดุลของแก๊สหรือไอของสารถูกดูดซับ หรือความเข้มข้นสมดุลของสารถูกดูดซับ ในของเหลวกับอุณหภูมิสมดุล

แม้ว่าการดูดซับเป็นปรากฏการณ์คายความร้อน แต่ความร้อนของการดูดซับทั่วไปมักมีค่าน้อยกว่าความร้อนของปฏิกิริยาเคมีมาก และสามารถระบายออกจากระบบดูดซับได้โดยง่าย อุณหภูมิของระบบการดูดซับจึงเปลี่ยนแปลงน้อย ดังนั้นจึงนิยามวัดแบบจำลองสมดุลดูดซับอุณหภูมิคงที่ หรือเรียกว่าไอโซเทอร์มการดูดซับ

โดยทั่วไปมักจะควบคุมให้อุณหภูมิของการดูดซับให้คงที่ และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับกับความดันหรือความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุลของการดูดซับ โดยเส้นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวเรียกว่า “ไอโซเทอร์ม (isotherm)” แสดงดังภาพที่ 2.11 ซึ่งเป็นการจำแนกไอโซเทอร์ม การดูดซับแก๊สตามระบบ IUPAC (สโรชา เฟื่องศรี, 2555; เสาวภา ไวยสุศรี, 2558; อติศักดิ์ กิริรักษ์, 2561)

ไอโซเทอร์ม 5 ชนิดแรก (Type I ถึง Type 5) ได้มีการจำแนกไว้ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1940 โดยนักวิทยาศาสตร์ 4 ท่าน คือ S. Brunauer, L.S. Deming, W.S. Deming และ E. Teller หรืออาจเรียกการจำแนกไอโซเทอร์ม 5 ชนิดแรกว่าเป็นการจำแนกตามแบบของ BDDT แสดงดังภาพที่ 2.11

Type I เป็นไอโซเทอร์ม สำหรับการดูดซับที่เป็นแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) หรือที่เรียกว่า แบบแลงมัวร์ (Langmuir) เป็นแบบที่ง่ายที่สุด โดยเป็นการดูดซับของสารที่ไม่มีความพรุนหรือมีรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก เช่น ถ่านกัมมันต์หรือซีโอไลต์ สามารถพบทั้งในการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ ซึ่งปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความดันสัมพัทธ์ (relative pressure) ต่ำ ๆ และที่ความดันสัมพัทธ์สูงเข้าใกล้ 1 จะมีการดูดซับเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย

Type II ไอโซเทอร์มรูปตัวเอส (S - shaped Isotherm) มักจะเกิดขึ้นกับวัสดุที่ไม่มีความพรุนหรือมีรูพรุนขนาดใหญ่ (macropores) ที่จุดเปลี่ยนกราฟ จุด B (inflection point or knee of isotherm) เป็นตำแหน่งที่ผิวหน้าถูกคลุมแบบชั้นเดียวเกือบสมบูรณ์แล้ว เมื่อเพิ่มความดันจะทำให้การดูดซับเกิดขึ้นมากกว่าหนึ่งชั้น ดังนั้น การดูดซับแบบนี้จึงเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer adsorption)

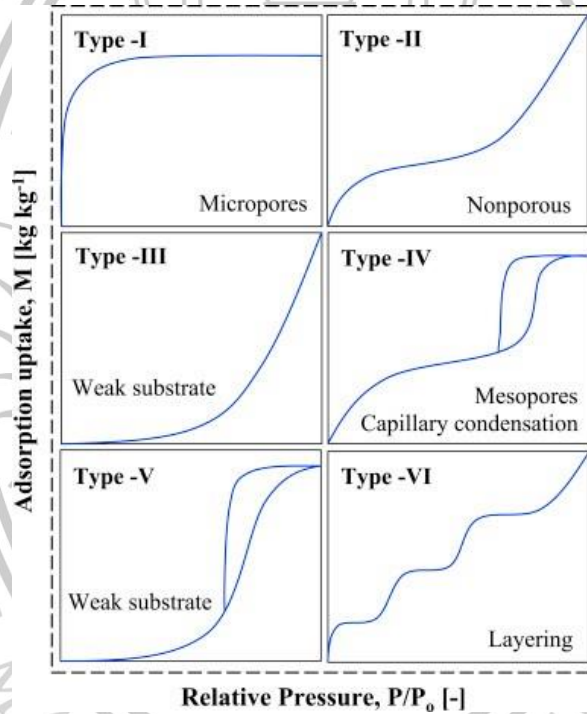
Type III เป็นไอโซเทอร์มที่ไม่มีจุดเปลี่ยนกราฟ มีรูปร่างคล้ายกระจกแก้ว ซึ่งไอโซเทอร์มแบบนี้ไม่ค่อยพบมากนัก โดยจะเกิดกับการดูดซับที่ไม่แข็งแรง เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นกับของแข็งที่ไม่มีรูพรุน (nonporous solid) และของแข็งที่มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ แต่เป็นพวกที่มีแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับ และตัวถูกดูดซับที่ไม่แข็งแรงทำให้ดูดซับได้น้อย เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียวที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำ แต่เมื่อเกิดการดูดซับแบบหลายชั้นจะเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยกันเองทำให้ดูดซับได้มากขึ้นที่ความดันสัมพัทธ์ที่มีค่าสูง

Type IV เป็นไอโซเทอร์ม ที่พบมากในวัสดุที่มีรูพรุนส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดกลาง (ขนาดรูพรุนระหว่าง 2 - 50 นาโนเมตร) ในช่วงแรกซึ่งมีค่าความดันสัมพัทธ์ต่ำ เส้นไอโซเทอร์มจะเหมือนกับไอโซเทอร์มชนิดที่ 2 จากนั้นการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความดันสัมพัทธ์สูงขึ้นเนื่องจากเกิดการควบแน่นแคปิลลารี (capillary condensation) ขึ้นในรูพรุน ซึ่งทำให้เกิด hysteresis loop ในช่วง desorption ซึ่งข้อมูลของการเกิดการควบแน่นในช่วงแคปิลลารีสามารถ

นำมาคำนวณหา การกระจายขนาดของรูพรุน (pore size distribution) ในของแข็งที่มีรูพรุนขนาดกลางได้การควบแน่นแคปิลารีทำให้ช่วง desorption มีปริมาณดูดซับที่สูงกว่าการเกิดการดูดซับที่ความดันเท่ากัน

Type V เหมือนไอโซเทอร์ม ชนิด Type IV ต่างกันเพียงเกิดการควบแน่นในรูพรุน (มี hysteresis loop) ไอโซเทอร์มแบบนี้จะพบไม่บ่อยนัก

Type VI เป็นไอโซเทอร์มแบบขั้นบันได (stepped isotherm) ไอโซเทอร์มแบบนี้จะพบน้อยมาก ซึ่งสามารถพบในระบบที่เป็นการดูดซับแบบขั้นต่อขั้นบนพื้นผิวที่มีความสม่ำเสมอของพลังงานการดูดซับ (uniform surface) โดยรูปร่างของไอโซเทอร์มจะขึ้นอยู่กับระบบ และอุณหภูมิในการดูดซับ



ภาพที่ 2.11

ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

ที่มา :

ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต, ม.ป.ป.

ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

ไอโซเทอร์มของการดูดซับ คือ กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารที่ถูกดูดซับกับความเข้มข้นของสารที่จุดสมดุลที่อุณหภูมิคงที่ ในการศึกษาไอโซเทอร์มนั้นจะต้องมีการทำการทดลองหาปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของวัสดุดูดซับ เพื่อนำค่าที่ได้จากการทดลองดังกล่าวไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารที่ถูกดูดซับความเข้มข้นที่จุดสมดุลที่อุณหภูมิคงที่ (กุลธิดา สะอาด, 2557; อัญรินทร์ พิธาภักคีสติชัย, 2559; Ayu et al., 2018; Rengga et al., 2021)

การอธิบายถึงไอโซเทอร์มการดูดซับของเหลวสามารถทำได้โดยอาศัยแบบจำลองต่าง ๆ ดังนี้

1. ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm)

ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์เสนอโดย เออร์วิง แลงเมียร์ (Irving Langmuir) เป็นไอโซเทอร์มการดูดซับที่ใช้กันมากในการดูดซับแบบชั้นเดียว และเป็นการดูดซับทางกายภาพ ซึ่งสามารถใช้ได้ดีที่สุดเมื่ออธิบายความเข้มข้นต่ำ ๆ โดยมีสมมติฐานคือ โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนและตำแหน่งของการดูดซับ (adsorption site) ที่แน่นอน โดยในแต่ละตำแหน่งของโมเลกุลของสารดูดซับจะบรรจุโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น โดยในแต่ละตำแหน่งมีค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากันและคงที่ และไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน ซึ่งมีสมมติฐานการดูดซับ คือ โมเลกุลจะถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวที่จำกัด และพื้นที่ของสารดูดซับเหมาะสมกับโมเลกุลที่เป็นแบบชั้นเดียว พลังงานของการดูดซับจะเท่ากันในทุกพื้นที่และไม่มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างไอออนหรือโมเลกุลที่ถูกดูดซับ นอกจากนี้โมเลกุลที่จะถูกดูดซับไม่สามารถที่จะย้ายข้ามผิว หรือเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลข้างเคียงได้ และจะไม่มีการเคลื่อนย้าย หรือเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของไอออน หรือโมเลกุลที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ อีกทั้งการดูดซับจะเกิดขึ้นบนพื้นผิวที่มีพื้นที่ในการดูดซับที่แน่นอนและพื้นที่นั้น ๆ เกิดการดูดซับโมเลกุลได้เพียงชั้นเดียวเท่านั้น และการดูดซับที่เกิดขึ้นนั้นสามารถผันกลับได้ (กุลธิดา สะอาด, 2557; อัญรินทร์ พิธาภักคีสติชัย, 2559; Abdullah & Choudhary, 2017; Ayu et al., 2018; Bayrak, 2006; Sabo, 2021)

ความสัมพันธ์ที่จุดสมดุลของสารดูดซับและสารถูกดูดซับในระบบมีลักษณะโค้งว่าสมการของการดูดซับจะสามารถอธิบายได้โดยแบบจำลองการดูดซับของเหลวของแลงเมียร์

จากการศึกษาไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ที่สภาวะสมดุล สามารถแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับสารละลายได้ดังสมการที่ 2.6

สมการ

$$q_e = \frac{bq_m C_e}{(1+bC_e)} \quad (2.6)$$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณของสารถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักสารดูดซับ (mg/g)

b คือ ค่าคงที่แลงเมียร์ที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ

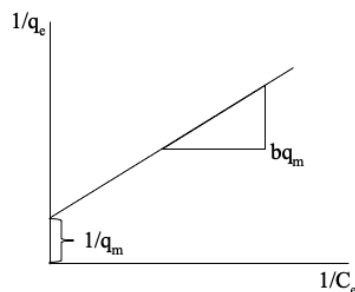
q_m คือ ปริมาณสารถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับสูงสุด (mg/g)

C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่สภาวะสมดุล (mg/l)

ปริมาณสารถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับสูงสุด (q_m) และค่าคงที่แลงเมียร์ (b) สามารถคำนวณได้จากจุดตัดแกนตั้ง และความชันของความสัมพันธ์เส้นตรงระหว่างส่วนกลับของปริมาณสารถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ ($1/q_e$) กับส่วนกลับของความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่สภาวะสมดุล ($1/C_e$) ดังสมการที่ 2.7 และภาพที่ 2.13

สมการ

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{bq_m C_e} + \frac{1}{q_m} \quad (2.7)$$



ภาพที่ 2.12 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์

ที่มา : อัญรินทร์ พิธากค์คีตติต, 2559

ถึงแม้ว่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด (q_m) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญ แต่ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด (q_m) ดังกล่าวอาจมิใช่สมมูลดูดซับสารถูกดูดซับจำเพาะสูงสุด (q_m) ที่เกิดขึ้นได้จริงในระบบสารดูดซับของเหลวนั้น เมื่อความเข้มข้นสมมูลของสารถูกดูดซับในของเหลวมีค่าจำกัด เช่น ความเข้มข้นของไอออนชนิดต่าง ๆ ในน้ำมักมีค่าน้อยกว่าค่าความสามารถในการละลายน้ำของสารประกอบไอออนชนิดนั้น ๆ หรือความเข้มข้นของความชื้นในน้ำมัน เป็นต้น (ลลิตา แสงอาทิตย์, 2554)

2. ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich adsorption isotherm)

ไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรอนด์ลิชเสนอโดย ฟินเลย์ ฟรอนด์ลิช (Findlay Freundlich) จากสมมติฐาน คือ พลังงานการดูดซับบนพื้นผิวมีค่าไม่คงที่ โดยสามารถแบ่งพื้นที่ของการดูดซับออกเป็นกลุ่ม ๆ (patchwise) ตามระดับพลังงาน พื้นที่ผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด ในแต่ละกลุ่มจะประกอบด้วยบริเวณดูดซับที่มีพลังงานการดูดซับที่เท่ากัน โดยแต่ละกลุ่มจะเกิดการดูดซับที่เป็นอิสระต่อกัน หรือกล่าวได้ว่ามาจากสมมติฐานที่ว่า โมเลกุลของสารถูกดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer) บนพื้นผิวของสารดูดซับ ข้อจำกัดของสมการฟรอนด์ลิช คือ ปริมาณสารถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักสารดูดซับไม่เข้าสู่ค่าคงที่ที่ความเข้มข้นสูง ๆ โดยปกติจะใช้อธิบายข้อมูลการดูดซับได้ในช่วงแคบ ๆ สมการแสดงความสัมพันธ์ปริมาณของสารถูกดูดซับกับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่สถานะสมดุล ดังสมการที่ 2.8 (กุลธิดา สะอาด, 2557; อัญรินทร์ พิธาภักดีสถิตย์; 2559; Abdullah & Choudhary, 2017; Ayu et al., 2018; Bayrak, 2006; Sabo, 2021)

สมการ

$$q_e = \frac{X}{m} = K_f C_e^{1/n} \quad (2.8)$$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณของสารถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักสารดูดซับ (mg/g)

K_f คือ ค่าคงที่สมมูลดูดซับของเหลวของฟรอนด์ลิช

แสดงถึงความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับ (mg/g)

C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่สถานะสมดุล (mg/l)

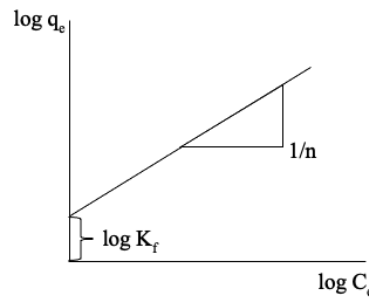
n คือ ค่าคงที่แสดงถึงความแข็งแรงในการดูดซับ

เมื่อค่า n มีค่าเพิ่มขึ้น กราฟไอโซเทอร์มของการดูดซับจะมีค่าความโค้งมากขึ้น และเมื่อ n มีค่าใกล้เคียงกับ 1 แล้ว K_f จะเปลี่ยนเป็นค่าคงที่สมมูลการดูดซับของเหลวของเฮนรี (K_H) ค่า n

และ K_f สามารถคำนวณได้จากจุดตัดแกนตั้งและความชันของกราฟเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ของค่าลอการิทึมของค่าปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักสารดูดซับ ($\log q_c$) กับค่าลอการิทึมของค่าความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่สถานะสมดุล ($\log C_c$) ดังสมการที่ 2.9 และภาพที่ 2.13 (กุลชิตา สะอาด, 2557; อัญรินทร์ พิธาภักดีสถิตย์; 2559)

สมการ

$$\log q_c = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_c \quad (2.9)$$



ภาพที่ 2.13 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟรอนคลิช
ที่มา : อัญรินทร์ พิธาภักดีสถิตย์ (2559)

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log q_c$ และ $\log C_c$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $1/n$ และจะมีจุดตัดแกนเท่ากับ $\log K_f$ สำหรับค่า $1/n$ หมายถึงไอโซเทอร์มของการดูดซับ ถ้าเท่ากับ 1 ไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นเส้นตรง ถ้ามากกว่า 1 หมายถึงบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากที่จะใช้ในการดูดซับ และถ้าน้อยกว่า 1 หมายถึงปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับมีปริมาณจำกัดที่จะใช้ในการดูดซับ

3. การดูดซับของ BET

สมมติฐานเบื้องต้นของสมการนี้ คือ โมเลกุลที่ถูกดูดซับในชั้นแรกจะเป็นพื้นผิวในการเกาะของสารที่ถูกดูดซับในชั้นที่สองและชั้นต่อไป ดังนั้น โมเลกุลในชั้นที่สองจะเกาะอยู่บนสารที่ถูกดูดซับไม่ใช่พื้นผิวของสารดูดซับ จึงเหมือนอยู่ในภาวะอิมตัวเองของของเหลว แตกต่างจากในชั้น

แรกที่โมเลกุลสัมผัสกับพื้นผิวของสารดูดซับโดยตรง (พัชรินทร์ โสระสิงห์, 2562; อัญรินทร์ พิธาภักดีสถิตย์, 2559)

ในปัจจุบันการใช้สมการการดูดซับ BET เพื่อหาขนาดพื้นที่ของตัวดูดซับได้รับการยอมรับทั่วไป ซึ่งพื้นที่ผิวสามารถหาได้จากการหาปริมาณแก๊สดังกล่าวมาเปลี่ยนจำนวนโมเลกุลของแก๊สที่ปกคลุมพื้นที่ผิวเต็มหนึ่งชั้นคูณด้วยพื้นที่สำหรับการปกคลุมด้วยแก๊สหนึ่งโมเลกุล จากนั้นนำพื้นที่ทั้งหมดหารด้วยน้ำหนักของตัวดูดซับที่นำมาทดสอบจะได้พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับนั้น (อดิศักดิ์ กิริรัช, 2561)

ไอโซเทอร์มแบบบีอีที (BET) ใช้ในการอธิบายการดูดซับทางกายภาพแบบหลายชั้น สมมติฐานของไอโซเทอร์มนี้เหมือนกับแบบแลงเมียร์ และมีข้อพิจารณาเพิ่มเติม คือ สารถูกดูดซับอยู่ในผิวหน้าชั้นแรกซึ่งจะเป็นตำแหน่งสำหรับสารถูกดูดซับในชั้นต่อไป ค่าพลังงานการดูดซับในแต่ละชั้นจะมีค่าคงที่ และไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับในแต่ละชั้นของการดูดซับ ไอโซเทอร์มการดูดซับของบีอีที (พัชรินทร์ โสระสิงห์, 2562) แสดงดังสมการที่ 2.10

สมการ

$$q_e = \frac{q_s C_{BET} C_e}{(C_s - C_e)[1 + (C_{BET} - 1)(C_e / C_s)]} \quad (2.10)$$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณของสารถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักสารดูดซับ (mg/g)

q_s คือ ปริมาณสารถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับสูงสุดแบบชั้นเดียว (mg/g)

C_{BET} คือ ค่าคงที่

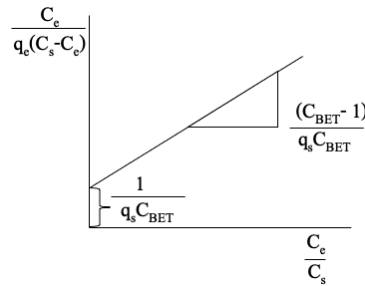
C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่สภาวะสมดุล (mg/l)

C_s คือ ความเข้มข้นอิ่มตัวของตัวถูกละลาย (mg/l)

ค่า q_e และ C_{BET} สามารถคำนวณได้จากจุดตัดแกนตั้ง และความชันของกราฟเส้นตรง แสดงความสัมพันธ์ของค่า $\frac{C_e}{q_s(C_s - C_e)}$ กับค่า C_e / C_s ดังสมการที่ 2.11 และภาพที่ 2.14

สมการ

$$\frac{C_e}{q_s(C_s - C_e)} = \frac{1}{q_s C_{BET}} + \frac{(C_{BET} - 1)(C_e/C_s)}{q_s C_{BET}} \quad (2.11)$$



ภาพที่ 2.14 ไอโซเทอร์มการดูดซับบีอีที
ที่มา : อัญรินทร์ พิธากักคีสถิตย์, 2559

จลนพลศาสตร์การดูดซับ (Adsorption kinetics)

จลนพลศาสตร์การดูดซับ เป็นสมการที่ใช้ในการอธิบายอัตราเร็วของการดูดซับ เพื่อใช้ในการออกแบบการดูดซับ โดยปกติแล้วอัตราเร็วของการดูดซับจะมีค่ามากในช่วงเริ่มต้นของการดูดซับ และจะมีอัตราเร็วลดลงอย่างช้า ๆ จนเข้าสู่จุดสมดุลของการดูดซับ นิยมใช้แบบจำลองจลนพลศาสตร์ในการดูดซับ (กุลธิดา สะอาด, 2557; อัญรินทร์ พิธากักคีสถิตย์, 2559) ดังนี้

1. แบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) ซึ่งเป็นการอธิบายสมมุติฐานของการดูดซับที่เป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างผิวตัวดูดซับกับโมเลกุลตัวถูกดูดซับ โดยใช้สมการจลนพลศาสตร์ สามารถเขียนอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียมดังสมการที่ 2.12

สมการ

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (2.12)$$

เมื่อ K_1 คือ ค่าคงที่อัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (min^{-1})

q_t คือ ความสามารถในการดูดซับ ณ เวลาใดๆ (mg/g)

q_e คือ ความสามารถในการดูดซับ ณ จุดสมดุล (mg/g)

เมื่อทำการอินทิเกรตสมการที่ 2.12 โดยมีขอบเขตตั้งแต่ $t=0$ ถึง $t=t$ และตั้งแต่ $q_t=0$ ถึง $q_t=t$ จะได้สมการที่ 2.13

สมการ

$$\log \frac{q_e}{q_e - q_t} = \frac{k_1}{2.303} t \quad (2.13)$$

เมื่อจัดสมการให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้น จะได้สมการที่ 2.14

$$\log (q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad (2.14)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log (q_e - q_t)$ กับ t จะให้ความชันเท่ากับ $-k_1/2.303$ และได้จุดตัดแกน y เท่ากับ $\log q_e$

2. แบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม (Pseudo-second order) ซึ่งเป็นการอธิบายการดูดซับที่เป็นผลมาจากแรงดึงดูดไฟฟ้าและเป็นการดูดซับทางเคมีที่มีผลมาจากตำแหน่งการเกิดปฏิกิริยา (Active site) จากปฏิกิริยาการดูดซับดังนี้ สมการที่ 2.15

สมการ

$$\frac{d q_t}{dt} = k_2 (q_e - q_t)^2 \quad (2.15)$$

เมื่อ K_2 คือ ค่าคงที่อัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (min^{-1})

เมื่อทำการอินทิเกรตสมการที่ 2.15 โดยมีขอบเขตตั้งแต่ $t=0$ ถึง $t=t$ และตั้งแต่ $q_t=0$ ถึง $q_t=t$ จะได้สมการที่ 2.16

สมการ

$$\frac{1}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} \quad (2.16)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $1/q_t$ กับ t จะให้ความชันเท่ากับ $1/q_e$ และได้จุดตัดแกน y เท่ากับ $1/k_2 q_e^2$

อุณหพลศาสตร์การดูดซับ (Adsorption thermodynamics)

กระบวนการดูดซับเป็นการเปลี่ยนแปลงที่สามารถผันกลับได้ หรืออาจกล่าวได้ว่าสารถูกดูดซับดูดซับบนตัวดูดซับแล้วสามารถหลุดออกจากตัวดูดซับได้เมื่อเข้าสู่สภาพสมดุล สามารถอธิบายได้ด้วยหลักทางอุณหพลศาสตร์ ด้วยพารามิเตอร์ประกอบด้วยค่าพลังงานอิสระของกิบส์เฉลี่ย (ΔG^0) การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี (ΔH^0) และการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (ΔS^0) ซึ่งสามารถบอกถึงประเภทของปฏิกิริยาและการเกิดขึ้นได้เองของปฏิกิริยา สำหรับสมการพลังงานอิสระของกิบส์เฉลี่ย การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี และการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี แสดงดังสมการที่ 2.17 - 2.19

สมการ

$$K_c = \frac{C_{ae}}{C_e} \quad (2.17)$$

$$\Delta G^0 = -RT \log K_c \quad (2.18)$$

$$\log K_c = \frac{\Delta S^0}{2.303 R} - \frac{\Delta H^0}{2.303 RT} \quad (2.19)$$

- เมื่อ ΔG^0 คือ พลังงานอิสระของกิบส์เฉลี่ย (kJ/mol)
 ΔH^0 คือ การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี (kJ/mol)
 ΔS^0 คือ การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (J/mol.K)
 R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 J/mol.K)
 T คือ อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน (K)
 K_c คือ ค่าคงที่สมดุลการดูดซับ
 C_{ae} คือ ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในตัวดูดซับ (mg/L)
 C_e คือ ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในสารละลาย (mg/L)

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิมลมาศ ศิริวาณิชย์ (2558) ศึกษาการดูดซับกรดไขมันอิสระจากน้ำมันด้วยขานอ้อย และเถาขานอ้อย โดยนำขานอ้อยมาร่อนให้มีขนาด 1.0-2.36 มิลลิเมตร ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก เข้มข้น 6 โมลาร์ ด้วยวิธีการรีฟลักซ์ ณ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง กรองและล้างด้วยน้ำจืดที่มีค่า pH เท่ากับ 7 อบและร่อนให้มีขนาด 75-90 ไมโครเมตร และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 400 และ 500 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 2 องศาเซลเซียส/นาทิตนาน 3 ชั่วโมง สำหรับเถาขานอ้อยนำมาล้างทำความสะอาด อบให้แห้งปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 6 โมลาร์ อัตราส่วนสารเคมีต่อเถา 10 มิลลิกรัม : 1 กรัม เวลาในการปรับสภาพ 1-6 ชั่วโมง จากนั้นกรอง และล้างน้ำจืดที่มีค่า pH เท่ากับ 7 อบและร่อนให้มีขนาด 75-90 ไมโครเมตร นอกจากนี้ยังได้ศึกษากระบวนการไฮโดรเทอร์มอลของเถาขานอ้อย โดยนำเถาขานอ้อยแช่โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 6 โมลาร์ ในภาชนะสเตนเลส ณ อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นใส่หม้อนึ่งความดันและใส่ในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 72 ชั่วโมง ทำการกรองและล้างจนมีค่า pH เท่ากับ 7 อบให้แห้ง และร่อนให้มีขนาด 75-90 ไมโครเมตร ทำการศึกษาการดูดซับโดยใช้กรดโอเลอิกและกรดคาพริก (capric acid) เป็นตัวแทนของกรดไขมันอิสระ สารละลายกรด 25 มิลลิลิตร ความเข้มข้นร้อยละ 0.25 ปริมาณตัวดูดซับ 0.2 กรัม กวนผสมเป็นเวลา 30 นาที ณ อุณหภูมิ 25, 35 และ 45 องศาเซลเซียส และปล่อยให้ไว้ 30 นาที ทำการกรองแยกด้วยกรองเมมเบรนในลอนขนาด 0.45 ไมโครเมตร ผลการศึกษาพบว่า ขานอ้อยที่ไม่ได้ปรับสภาพมีความสามารถในการดูดซับน้อยที่สุด ขานอ้อยที่ปรับสภาพด้วยกรดและเผาจะมีความสามารถในการดูดซับสูงกว่าที่ไม่ได้เผา อาจมีสาเหตุมาจากการเผาทำให้ปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้น ขานอ้อยที่เผาด้วยอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส มีความสามารถในการดูดซับสูงสุด 38.6 mg/g สำหรับถ่านขานอ้อยที่ไม่ได้ปรับสภาพด้วยด่างนั้นมีความสามารถในการดูดซับกรดโอเลอิกสูงสุด 26.8 มิลลิกรัม/กรัม ซึ่งสูงกว่าการปรับสภาพด้วยด่างที่ระยะเวลาต่าง ๆ และเถาขานอ้อยที่ปรับสภาพด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลมีความสามารถในการดูดซับสูงสุด 40.2 มิลลิกรัม/กรัม จึงเลือกถ่านขานอ้อยที่ปรับสภาพด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลมาทำการศึกษาการดูดซับในกรดคาพริก พบว่ามีความสามารถในการดูดซับกรดคาพริกสูงกว่าสำหรับกรดโอเลอิก นอกจากนี้ได้ศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับพบว่า การดูดซับกรดโอเลอิกเป็นไปตามแบบจำลองฟรุนดลิช ส่วนการดูดซับกรดคาพริกเป็นไปตามแบบจำลองของแลงเมียร์ เมื่อนำไปทดสอบการดูดซับในน้ำมันถั่วเหลือง วัสดุดูดซับจะมีความสามารถในการดูดซับน้อยกว่าการทดลองดูดซับในสารละลายกรดไอโซออกเทน

Ayu et al. (2018) ศึกษาการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปรุงอาหารเกรดต่ำ โดยใช้ซีโอไลต์จากธรรมชาติเป็นตัวดูดซับ ซีโอไลต์นำมากระตุ้นด้วยการแช่กรดไฮโดรคลอริก (HCl)

และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 1 โมลาร์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิห้อง จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นและเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นศึกษาการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปรุงอาหารเกรดต่ำโดยใช้อัตราส่วนน้ำมันต่อซีโอไลท์ 8:2 เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิ 25, 40 และ 80 องศาเซลเซียส ทำการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระหลังการดูดซับด้วยวิธีการไทเทรชัน จากผลการศึกษาด้วยเทคนิค FTIR พบว่า ซีโอไลท์มีช่วงความยาวคลื่น 462.92 เซนติเมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นช่วงสเปกตรัมของ Si-O-Al สำหรับซีโอไลท์ที่กระตุ้นด้วยกรด และต่างจะมีช่วงความคลื่นอยู่ที่ 470.63 และ 455.20 เซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับ โดยจะเกิดจากปฏิกิริยาการตกตะกอนและการสลายตัวบนโครงสร้างอลูมิโนซิลิเกต จากการศึกษาด้วยเทคนิค XRS พบว่าการกระตุ้นด้วยกรดไฮโดรคลอริกจะมีอัตราส่วนของ Si/Al เพิ่มขึ้น แต่การกระตุ้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์จะมีอัตราส่วนของ Si/Al ลดลง สำหรับผลการศึกษาดูดซับกรดไขมันอิสระพบว่า ซีโอไลท์ที่ถูกกระตุ้นด้วยด่างนั้นทำให้ปริมาณกรดไขมันอิสระลดลงเหลือร้อยละ 0.15 ซึ่งน้ำมันก่อนทำการดูดซับนั้นมีปริมาณกรดไขมันอิสระร้อยละ 0.4 โดยสามารถดูดซับได้สูงถึงร้อยละ 62.5 สำหรับซีโอไลท์ที่ไม่ถูกกระตุ้น และถูกกระตุ้นด้วยกรดภายหลังการดูดซับทำให้มีค่ากรดไขมันอิสระเหลือร้อยละ 0.33 และ 0.2 ตามลำดับ และมีความสามารถในการดูดซับร้อยละ 17.5 และ 50 ตามลำดับ เนื่องจากโครงสร้างที่ไม่สม่ำเสมอของอลูมิโนซิลิเกตทำให้ความสามารถในการดูดซับของซีโอไลท์ต่ำ และเมื่อถูกกระตุ้นด้วยกรดทำให้อัตราส่วน Si/Al เพิ่มขึ้น และไม่ชอบน้ำ กรดไขมันอิสระเป็นสารประกอบคาร์บอกซิลิกซึ่งมีขั้วอยู่ในกลุ่มของคาร์บอกซิล (-COOH) ซึ่งเป็นอิเล็กโตรโพซิทีฟ (กรด) จึงหมายถึงกรดไขมันอิสระชอบพื้นผิวของตัวดูดซับที่ชอบน้ำ นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ โดยใช้ซีโอไลท์ที่กระตุ้นด้วยด่าง พบว่าแบบจำลองการดูดซับแบบฟรอนดลิจเป็นค่าประมาณที่ใกล้เคียงที่สุดของการดูดซับกรดไขมันอิสระ โดยมีค่าคงที่สมดุล (K_p) คือ 0.5873, 0.9629 และ 0.8053 และค่าประสิทธิภาพของกระบวนการดูดซับ (n) คือ 1.2931, 1.2297 และ 1.3706 ณ อุณหภูมิการดูดซับ 25, 40 และ 80 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

Chairgulprasert & Madlah (2018) ศึกษาการกำจัดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มโดยใช้เถ้าจากกากกาแฟ โดยนำกากกาแฟเผาด้วยอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมง น้ำมันปาล์มใช้แล้วโดยถูกทอดซ้ำ 5 ครั้ง ในการศึกษาการดูดซับจะใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้ว 50 มิลลิลิตร เขย่า 250 รอบ/นาที ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ปริมาณเถ้ากาแฟ 1-5 กรัม ระยะเวลาในการทดลอง 30-330 นาที และทำการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระด้วยวิธีการไทเทรชันด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากผลการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มใช้แล้ว พบว่ามีปริมาณกรดไขมันอิสระร้อยละ 4.7 และเมื่อเติมเถ้ากาแฟ 3-5 กรัม การดูดซับกรดไขมันอิสระจะมี

ประสิทธิภาพเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 30 นาทีแรก (ประสิทธิภาพการดูดซับร้อยละ 90) และมีประสิทธิภาพช้าลงจนถึงจุดสมดุลที่ 210 นาที ในขณะที่เดียวกันการเติมปริมาณเถ้ากาแฟ 1-2 กรัม เกิดการดูดซับกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาในการดูดซับเพิ่มขึ้น โดยกรดไขมันอิสระจะมีค่าลดลงร้อยละ 73.7-100.0 จากการเติมเถ้ากาแฟดูดซับ 1-5 กรัม ในการศึกษาครั้งนี้จึงเลือกการเติมเถ้ากาแฟ 1 กรัม ในการศึกษาอุณหภูมิการดูดซับที่ 30-60 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่ออุณหภูมิการดูดซับเพิ่มขึ้น มีค่า ΔH -89.07 กิโลจูล/โมล ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีจะมีค่าติดลบลดลงซึ่งแสดงถึงแรงดึงดูดแบบคายความร้อน การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปียังระบุถึงประเภทของการดูดซับ กระบวนการดูดซับทางกายภาพจะให้ความร้อนประมาณ 2.1-20.9 กิโลจูล/โมล ในขณะที่การดูดซับทางเคมีมีส่วนทำให้เกิด 80-200 กิโลจูล/โมล ดังนั้นในการศึกษาการดูดซับครั้งนี้เป็นการดูดซับเคมี การเปลี่ยนแปลงของเอนทัลปียังเป็นค่าลบที่สอดคล้องกับการลดระดับความเป็นกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มใช้แล้ว

Fahmi et al. (2018) ศึกษาการตัดแปรถ่านชีวภาพทางกายภาพ เพื่อเพิ่มรูพรุนภายในสำหรับการดูดซับตะกั่ว โดยใช้ถ่านชีวภาพจากทะเลสาบปาล์มเปล่าเผาที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส บดและร่อนให้มีขนาดต่างกัน ทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมี จากการศึกษาพื้นที่ผิวและรูพรุนด้วยเทคนิค BET พบว่าถ่านชีวภาพที่บดขนาดละเอียด (< 50 มิลลิเมตร) นั้นมีพื้นที่ผิวมากที่สุด และเป็นรูพรุนประเภทไมโครพอร์ สำหรับการศึกษาลักษณะทางเคมีพบว่าถ่านชีวภาพที่บดขนาดละเอียดมีค่า pH สูงกว่าที่บดขนาดหยาบ และขนาดกลาง เช่นเดียวกันกับค่าการนำไฟฟ้า เนื่องจากขนาดของอนุภาคที่เล็กลงจะมีค่า pH และค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การบดให้มีขนาดเล็กยังทำให้มีหมู่ฟังก์ชันและหมู่คาร์บอกซิลเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ศักยภาพซีตามิกของถ่านชีวภาพจะมีค่า 3.03 มิลลิโวลต์, 0.256 มิลลิโวลต์ และ 0.257 มิลลิโวลต์ สำหรับถ่านที่บดขนาดละเอียด (< 50 มิลลิเมตร) ขนาดกลาง (250-500 มิลลิเมตร) และขนาดหยาบ (> 2000 มิลลิเมตร) ซึ่งจะมีค่าลดลงเมื่อค่า pH เพิ่มขึ้น การศึกษาพบว่า การดูดซับของโลหะในสารละลายจะเกิดขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีประจุเป็นลบ และการดูดซับจะมีประสิทธิภาพที่ดีเมื่อตัวดูดซับมีศักย์ภาพซีตามิกต่ำ ทั้งนี้การตัดแปรตัวดูดซับทางกายภาพด้วยการบดให้มีขนาดเล็กลงสามารถช่วยให้อนุภาคมีสมบัติทางเคมีและกายภาพดีขึ้นได้

Hidayat, Adnan, & Diana (2018) ศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาจากทะเลสาบปาล์มเปล่าเพื่อใช้ในปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของของกรดไขมันอิสระในกากตะกอนน้ำมันปาล์ม โดยนำทะเลสาบปาล์มเปล่าเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียส/นาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และนำถ่านจากทะเลสาบปาล์มเปล่าไปตัดแปรด้วยวิธีการเคลือบผิวด้วย

เซอร์โคเนียมออกไซด์ไฮดรอกไซด์ ($ZrOCl_2 \cdot 8H_2O$) พร้อมให้ความร้อนร่วมกับการรีฟลักซ์เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นกรองและอบให้แห้ง เเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ศึกษาลักษณะของถ่านและตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค BET, XRF และ FTIR พบว่าถ่านจากทะเลสาบปลาลัมเปลา มีพื้นที่ผิว 179.961 ตารางเมตร/กรัม แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการตัดแปรมีพื้นที่ผิว 75.852 ตารางเมตร/กรัม ซึ่งมีพื้นที่ผิวลดลง อาจเกิดจากการเซอร์โคเนียและซัลโฟเนตที่เข้าไปจับกับรูพรุนภายใน ส่งผลให้ปริมาตรรูพรุนทั้งหมดของถ่านมีค่าต่ำกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา 0.2539 และ 0.2580 ลูกบาศก์เมตร/กรัม ตามลำดับ ในขณะที่เดียวกันค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของขนาดรูพรุนนั้น มีขนาดเพิ่มขึ้นเป็น 2.82 และ 6.81 นาโนเมตร ตามลำดับ ซึ่งเป็นรูพรุนที่อยู่ในช่วง mesopore และจากการศึกษาปริมาณกรดทั้งหมดก่อนและหลังการเคลือบด้วยสารเคมีนั้น มีปริมาณกรดทั้งหมด 1.1 และ 4.6 มิลลิโมล/กรัม ตามลำดับ ปริมาณกรดทั้งหมดที่เพิ่มขึ้นนั้นแสดงให้เห็นว่ามีการยึดฟังก์ชันซัลโฟเนต คาร์บอกซิลิก และฟีนอลิกไว้บนพื้นผิวได้จากการเคลือบ นอกจากนี้การวิเคราะห์ปริมาณธาตุพบว่า มีปริมาณซัลเฟอร์อยู่บนถ่านที่ตัดแปรร้อยละ 4.3 ซึ่งมากกว่าถ่านที่ไม่ได้ตัดแปรรูป สำหรับผลการวิเคราะห์กลุ่มฟังก์ชันบนพื้นผิวด้วยเทคนิค FTIR พบแถบที่แสดงลักษณะของ S=O ของกลุ่มฟังก์ชันซัลโฟเนตบนถ่านที่ผ่านการตัดแปรรูป (1,397 เซนติเมตร/วินาที) และยังพบพันธะ C=O บนกลุ่มฟังก์ชันคาร์บอกซิล (1,719 เซนติเมตร/วินาที) พันธะ C=C สำหรับโครงสร้างอะโรมาติก (1,610 เซนติเมตร/วินาที) และพันธะ O-H บนกลุ่มฟังก์ชันของฟีนอล (3,440 เซนติเมตร/วินาที) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าถ่านที่ผ่านการตัดแปรรูปนั้นประกอบด้วยกลุ่มของฟังก์ชันกรด เช่น ซัลโฟเนต ฟีนอล และกลุ่มฟังก์ชันคาร์บอกซิล ถ่านที่ตัดแปรรูปปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชันที่อัตราส่วนเมทานอลต่อกากตะกอนของน้ำมัน 14:1 ณ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซ้ำ 3 ครั้ง ยังคงสามารถช่วยลดปริมาณกรดไขมันอิสระได้ถึงร้อยละ 51

Hong et al. (2019) ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของถ่านชีวภาพที่การเผาด้วยอุณหภูมิ และแก๊สในการเผาต่างกัน โดยใช้ฟางข้าวนำมาเผาด้วยกระบวนการไพโรไลซิสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 300 - 800 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาพบว่าเมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้น ถ่านชีวภาพมีค่า pH เพิ่มขึ้น และยังมีกลุ่มฟังก์ชันออกซิเจนบนพื้นผิวลดลงเนื่องจากการสลายตัวของธาตุต่าง ๆ อีกทั้งถ่านชีวภาพยังมีประจุลบลดลง ศักยภาพของซิทาที่พื้นผิวของถ่านจะเพิ่มขึ้นทำให้มีค่าไอเล็กโตรเนกาติวิตีที่เป็นค่าความสามารถในการดึงดูดไอเล็กตรอนลดลง เมื่อนำถ่านชีวภาพไปทดสอบการดูดซับแคดเมียมในดิน พบว่าถ่านชีวภาพที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิเดียวกันภายใต้บรรยากาศแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์นั้นมีศักยภาพซิทาสูงกว่าการใช้แก๊สไนโตรเจน จึงมีค่าไอเล็กโตรเนกาติวิตีที่เป็นค่าความสามารถในการดึงดูดไอเล็กตรอนลดลง

ค่าศักยภาพชีตาที่เพิ่มขึ้นช่วยทำให้ถ่านชีวภาพมีความแข็งแรงสามารถดูดซับแคดเมียมได้ดี เนื่องจากมีแรงดึงดูดอนุภาคคอลลอยด์เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการตกตะกอนได้ง่ายกว่าถ่านที่เผาภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน

Ismaila et al. (2017) ศึกษาการดูดซับกรดไขมันอิสระที่ตกค้างหลังกระบวนการผลิตไบโอดีเซล โดยใช้ตัวดูดซับมันฝรั่ง แป้งมันสำปะหลัง และตัวดูดซับ Magnesol น้ำมันไบโอดีเซลที่ใช้ในการศึกษานี้ได้จากการผลิตโดยใช้น้ำมันปาล์มดิบมาผ่านกระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชัน วัสดุดูดซับที่ใช้จะนำมาอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำมาปรับสภาพด้วยการแช่โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โดยทำการศึกษ้อัตราส่วนของความเข้มข้นของ KOH : ผงตัวดูดซับที่อัตราส่วน 0.10:1, 0.15:1 และ 0.25:1 ทำการกวนในบีกเกอร์ ณ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ทำการดูดซับโดยใช้น้ำมันไบโอดีเซล 50 กรัม ทำการกวนที่ 150 รอบต่อนาที นาน 30 นาที จากผลการศึกษาพื้นที่ผิว และรูพรุนด้วยเทคนิค BET พบว่าตัวดูดซับโดยส่วนใหญ่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนอยู่ระหว่าง 30 ถึง 150 Å ซึ่งเป็นรูพรุนประเภทมิโซพอ โดยเมกนีเซียมซิลิเกตมีพื้นที่ผิวสูงถึง 137.8073 ตารางเมตร/กรัม และปริมาตรรูพรุนที่ใหญ่กว่า 0.389863 ลูกบาศก์เมตร/กรัม ตามด้วยแป้งมันสำปะหลังคัดแปร และมันฝรั่งคัดแปรที่มีพื้นที่ผิว 1.3492 และ 1.341 ตารางเมตร/กรัม และปริมาตรรูพรุน 0.001163 และ 0.001507 ลูกบาศก์เมตร/กรัม ตามลำดับ เมื่อทำการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันไบโอดีเซลพบว่า ตัวดูดซับแป้งมันคัดแปร และมันฝรั่งคัดแปรที่อัตราส่วนสารเคมีต่อวัสดุ 0.25:1 ปริมาณของตัวดูดซับ 0.5 กรัม มีประสิทธิภาพในการดูดซับกรดไขมันอิสระสูงสุดที่ร้อยละ 59.50 และมีความสามารถในการดูดซับ 223 - 233 มิลลิกรัม FFA ต่อกรัมของตัวดูดซับ สำหรับเมกนีซอลนั้นมีความสามารถในการดูดซับ 233 มิลลิกรัม FFA ต่อกรัมของตัวดูดซับ แต่มันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการแช่สารเคมีจะมีความสามารถในการดูดซับ 124-152 มิลลิกรัม FFA ต่อกรัมของตัวดูดซับ เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับแป้งมันคัดแปร และมันฝรั่งคัดแปรจะมีประสิทธิภาพการดูดซับเทียบเท่ากับการใช้เมกนีซอลทางการค้า

Liu et al. (2020) ศึกษาการเตรียมถ่านชีวภาพที่คัดแปรด้วยกรดและด่าง สำหรับกำจัดเมทิลินบลู โดยใช้เปลือกวอลนัท และไม้ที่ผ่านการร่อนเป็นผงให้มีขนาด 60 เมช ทำการเผาด้วยอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ด้วยเตาเผาแก๊สไนโตรเจน เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทำการคัดแปรโดยใช้สารเคมีได้แก่ กรดซัลฟูริก กรดฟอสฟอริก ซิงค์คลอไรด์ และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้นของสารเคมีร้อยละ 30 แช่สารเคมี ณ อุณหภูมิห้อง นาน 8 ชั่วโมง พร้อมทำการล้างและอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับเมทิลินบลู จากการศึกษาพบว่า หลังจากการคัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ถ่านชีวภาพจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการกระจายตัวของรูพรุนแบบมิโซพอร์ โดยพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านเปลือกวอลนัทนั้นมีขนาด

เล็กกว่าถ่านไม้ ทำให้ถ่านไม้มีการดูดซับเมทิลีนบลูได้ดีกว่าเปลือกวอลนัท และการดูดซับของถ่านทั้งสองชนิดนั้นสอดคล้องกับการดูดซับแบบฟรอนดลิตซ์ และการดูดซับทางกายภาพ

Munera-Echeverri et al. (2018) ศึกษาความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุของถ่านชีวภาพที่ผ่านการตัดแปรด้วยแอมโมเนียมอะซิเตท โดยใช้ถ่านชีวภาพจากถั่ว เปลือกโกโก้ ชั่งข้าวโพด และแกลบ โดยใช้วิธีและอุณหภูมิการเผาที่แตกต่างกัน ทำการคัดเลือกให้มีขนาดระหว่าง 0.5-2 มิลลิเมตร นำมาทำความสะอาดด้วยการแช่กรดไฮโดรคลอริก และน้ำปราศจากไอออน จากนั้นทำการปรับสภาพด้วยแอมโมเนียมอะซิเตท ล้างด้วยไอโซโพรพานอล และโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) เพื่อกำจัดแอมโมเนียมที่ตกค้าง จากการทดลองพบว่า จะต้องใช้แอมโมเนียมอะซิเตทเข้มข้น 2 โมลาร์ ทำการเขย่าเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงจะสามารถแยกไอออนบวกได้ และจะต้องใช้ไอโซโพรพานอลล้างถึง 4 ครั้ง จึงจะสามารถกำจัดแอมโมเนียมอะซิเตทส่วนเกินออกได้ทั้งหมด เนื่องจากไอโซโพรพานอลมีโมเลกุลค่อนข้างใหญ่แต่ในถ่านชีวภาพนั้นประกอบไปด้วยรูพรุนระดับไมโครพอร์จึงทำให้เกิดการล้างสารส่วนเกินออกได้ยาก นอกจากนี้ยังพบว่าไอออนบวกนั้นถูกกำจัดไปในช่วงของการปรับสภาพ ซึ่งมีค่ามากกว่าปริมาณไอออนบวกที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ สำหรับค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุของถ่านชีวภาพนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 10.8 cmol/Kg carbon เป็น 119.6 cmol/Kg carbon โดยถ่านชีวภาพจากแกลบและชั่งข้าวโพดนั้นจะมีไอออนบวกของ K^+ ที่สามารถแลกเปลี่ยนได้มากที่สุด สำหรับถ่านชีวภาพจากถั่วและเปลือกโกโก้มีไอออนบวกของ Ca^{2+} ที่สามารถแลกเปลี่ยนได้มากที่สุด

Narachai et al. (2018) ศึกษาการดูดซับกรดโอเลอิกในน้ำมันถั่วเหลือง โดยการใช้ MCM-41 ที่สังเคราะห์จากซิลิกาของแกลบ นำแกลบมาล้างทำความสะอาด อบให้แห้ง และทำการ refluxed ด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 3 โมลาร์ นาน 3 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส แกลบจะมีลักษณะเป็นสีดำ จากนั้นล้างทำความสะอาดเพื่อให้ค่า pH เท่ากับ 7 และอบให้แห้ง ทำการเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จะได้แกลบที่มีลักษณะเป็นสีขาว (RHS) จากนั้นนำ RHS ผสมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมลาร์ พร้อมทำการปั่นกวน เมื่อ RHS ละลายสมบูรณ์แล้วเติม Hexadecyltrimethyl ammonium bromide (CTAB) กวน ณ อุณหภูมิห้อง ปรับ pH ให้อยู่ในช่วง 11-12 โดยการเติมกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้น 2.5 โมลาร์ อย่างช้า ๆ จากนั้นนำเข้าหม้อนึ่งความดันไอน้ำและให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 3 วัน ทำการแยกสารสังเคราะห์ออกโดยการปั่นเหวี่ยง และด้วยน้ำปราศจากไอออนจนมีค่า pH เท่ากับ 7 อบให้แห้ง บดและร่อนให้มีขนาด 63-75 ไมโครเมตร ศึกษาสมมูลการดูดซับโดยนำไปทดสอบการดูดซับกรดโอเลอิกในช่วงความเข้มข้นร้อยละ 0.10- 3.00 โดยปริมาตร ระยะเวลาการดูดซับ 10-180 นาที อุณหภูมิ 25-50 องศาเซลเซียส และศึกษาปริมาณกรดไขมันอิสระด้วยวิธี

การไทเทรชันด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จากการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับด้วยไนโตรเจนของ MCM-41 พบว่าวัสดุดูดซับที่ผ่านการแช่สารเคมี และผ่านการเผาทั้งสองอยู่ในประเภท IV โดยวัสดุดูดซับที่ผ่านการเผามีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้น ผลการดูดซับกรดโอเลอิกที่ช่วงเวลาต่าง ๆ พบว่า จากการใช้ปริมาณตัวดูดซับ 0.25 กรัม ความเข้มข้นของกรดโอเลอิกร้อยละ 0.5 โดยปริมาตร ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส วัสดุที่ผ่านการแช่สารเคมีสามารถดูดซับเข้าสู่สมดุลได้รวดเร็วเพียง 15 นาที ส่วนวัสดุที่ผ่านการเผาจะเข้าสู่สมดุลการดูดซับที่ 60 นาที จึงเลือกที่ระยะเวลาการดูดซับ 60 นาทีเป็นช่วงเวลาการดูดซับที่ดีสำหรับวัสดุดูดซับทั้งสอง สำหรับการดูดซับกรดโอเลอิกในน้ำมันถั่วเหลือง ความเข้มข้นของกรดโอเลอิกร้อยละ 1 พบว่าวัสดุดูดซับที่ผ่านการแช่สารเคมีสมดุลการดูดซับ 178 มิลลิกรัม/กรัม และสามารถดูดซับได้ร้อยละ 16.2 ซึ่งมีค่าการดูดซับต่ำกว่าการดูดซับในกรดโอเลอิก เนื่องจากไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันถั่วเหลืองนั้นเคลือบอยู่บนพื้นผิวของวัสดุดูดซับ ส่งผลให้มีความสามารถในการดูดซับลดลง และการดูดซับเป็นไปตามแบบจำลองของแลงเมียร์ที่เกิดการคายความร้อน

Rahayu, Supriyatin & Bintari (2018) ศึกษาการใช้ถ่านกัมมันต์จากกากสับประรดขานอ้อย และเปลือกมะพร้าวในการลดจำนวนกรดไขมันอิสระ (FFA) จากน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยวัสดุจากกากสับประรด ขานอ้อย และเปลือกมะพร้าวจะให้ความร้อนที่ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที จากนั้นกระตุ้นด้วย $KMnO_4$ 0.1 นอร์มัล เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และล้างด้วย Aqua Dest อบที่อุณหภูมิ 115 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ร้อนให้มีขนาด 150, 180 และ 225 ไมโครเมตร น้ำมันพืชใช้แล้วจากการทอดปลาซึ่งผ่านการใช้งานซ้ำมาแล้ว 3 ครั้ง ในการทดสอบการดูดซับกรดไขมันอิสระนั้น ได้ใช้น้ำมันพืชใช้แล้ว 150 กรัม ถ่านกัมมันต์ 10 กรัม กวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กนาน 24, 48 และ 72 ชั่วโมง และกรองด้วยกระดาษกรองเพื่อนำน้ำมันที่ได้ไปวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระด้วยวิธีการไทเทรชัน จากผลการศึกษาพบว่า น้ำมันพืชใช้แล้วมีกรดไขมันอิสระร้อยละ 0.7 การแช่ถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยในน้ำมันพืชใช้แล้ว 24, 48 และ 72 ชั่วโมง จะมีปริมาณกรดไขมันอิสระอยู่ในช่วงร้อยละ 0.4-0.5, 0.3-0.4 และ 0.2-0.3 ตามลำดับ และพบว่าการใช้ถ่านกัมมันต์ขนาด 225 ไมโครเมตร นั้นสามารถดูดซับกรดไขมันอิสระได้ดีที่สุดตั้งแต่ 24 ชั่วโมงแรก ส่วนถ่านกัมมันต์จากกากสับประรดนั้นต้องใช้ระยะเวลาในการแช่ถ่านนานสุด 72 ชั่วโมง และใช้ถ่านขนาด 225 ไมโครเมตร จึงจะสามารถดูดซับกรดไขมันอิสระให้เหลือร้อยละ 0.3 เช่นเดียวกับถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะพร้าวที่ต้องใช้ระยะเวลาในการดูดซับ 72 ชั่วโมง และใช้ถ่านขนาด 225 ไมโครเมตร จึงจะสามารถดูดซับกรดไขมันอิสระให้เหลือร้อยละ 0.28 จากการศึกษาในครั้งนี้จึงเลือกถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยเป็นวัสดุที่สามารถดูดซับกรดไขมันอิสระจากน้ำมันพืชใช้แล้วได้ดีที่สุด เนื่องจากสามารถใช้เวลาในการดูดซับเพียง 24 ชั่วโมง ประกอบกับขานอ้อยเป็นวัสดุเหลือทิ้ง

ทางการเกษตรที่มีปริมาณมากในประเทศ จึงเป็นแนวทางในการส่งเสริมการผลิตถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรต่อไปได้

Rengga et al. (2021) ได้ศึกษาการดูดซับไอโซเทอร์มของกรดไขมันอิสระในน้ำมันใช้แล้ว โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากเปลือกกล้วยที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวดูดซับ และเผาที่อุณหภูมิ 600, 650 และ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ศึกษาการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยใช้เวลาในการเป็นดูดซับ 24 ชั่วโมง และใช้แบบจำลองการดูดซับไอโซเทอร์มทั้ง 4 แบบ จากการศึกษาพบว่า ระยะเวลาการดูดซับ 2 ชั่วโมง เป็นระยะเวลาที่เหมาะสมกับการศึกษาครั้งนี้ โดยไอโซเทอร์มแบบ Temkin จะเกิดการดูดซับความร้อนในกระบวนการดูดซับจะไม่คงที่ ความร้อนจากกระบวนการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เมื่อใช้ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยอุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้กระบวนการดูดซับไม่คงที่ ไอโซเทอร์มแบบ Langmuir เป็นแบบจำลองการดูดซับแบบชั้นเดียวบนถ่านกัมมันต์ มีค่า R_L อยู่ระหว่าง 0-1 แสดงว่าระบบมีการดูดซับที่เหมาะสม โดยการศึกษาครั้งนี้มีค่าน้อยกว่า 1 (0.748-0.773) และมีค่า R^2 0.96 ไอโซเทอร์มแบบ Freundlich เป็นแบบจำลองการดูดซับหลายชั้นบนผิวของถ่านกัมมันต์ การดูดซับจะมีแนวโน้มที่ดีเมื่อพบค่า K_F ในช่วง 1-20 และควรมีค่า n มากกว่า 1 จากการศึกษาในครั้งนี้พบว่า มีค่า K_F 1.0-1.5 และมีค่า n เท่ากับ 1.2-1.3 และยังมีค่า R^2 0.97 และ ไอโซเทอร์มแบบ Dubinin-Radushkevich มักถูกนำมาใช้ในการศึกษาการดูดซับที่แตกต่างกัน สำหรับงานวิจัยนี้พบว่า มีค่า E น้อยกว่า 8 กิโลจูล/โมล ซึ่งแสดงสมบัติการดูดซับทางกายภาพ เนื่องจากค่า E มากกว่า 8 kJ/mol จะเป็นสมบัติการดูดซับทางเคมี ดังนั้น ไอโซเทอร์มแบบ Freundlich สามารถอธิบายการดูดซับกรดไขมันอิสระบนถ่านกัมมันต์จากเปลือกกล้วยได้ดีที่สุดจากการใช้ถ่านกัมมันต์เปลือกกล้วยเผากระตุ้นที่ 700 องศาเซลเซียส โดยสามารถบอกถึงการดูดซับที่ไม่สม่ำเสมอ และมีความสามารถในการดูดซับสูงสุด 27,404 มิลลิกรัม/กรัม ซึ่งเป็นการดูดซับทางกายภาพ

Yang et al. (2019) ศึกษาการเตรียมปัจจัยต่าง ๆ รวมถึงวิธีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมี และกายภาพของถ่านชีวภาพ เพื่อใช้ในการกำจัดโลหะหนักและสารมลพิษอินทรีย์ในดิน ในการเตรียมถ่านชีวภาพสามารถเตรียมได้หลากหลายวิธี เช่น กระบวนการไพโรไลซิส ไฮโดรเทอร์มอล และคาร์บอนไนเซชัน เป็นต้น วิธีการเตรียมที่ต่างกันทำให้มีสมบัติทั้งทางเคมีและทางกายภาพที่แตกต่างกัน เช่น ขนาดรูพรุน พื้นที่ผิว จำนวนกลุ่มฟังก์ชัน และความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ เป็นต้น การกระเตรียมถ่านชีวภาพโดยทั่วไปจะใช้กระบวนการไพโรไลซิสซึ่งจะใช้อุณหภูมิมากกว่า 400 องศาเซลเซียส ทั้งนี้การใช้อุณหภูมิการไพโรไลซิสเพิ่มขึ้นจะทำให้ได้ผลผลิตและจำนวนหมู่ฟังก์ชันลดลง แต่จะมีหมู่ฟังก์ชันต่าง ปริมาณเถ้า และค่า pH เพิ่มขึ้น ทั้งนี้การเพิ่มอุณหภูมิการเผายังส่งผลต่อพื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุนด้วยเช่นกัน ถ่านชีวภาพที่ได้

จากการเผาอาจมีสมบัติไม่เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้ประโยชน์จึงได้มีการศึกษาการตัดแปร หรือการตัดแปรถ่านชีวภาพเพื่อให้ได้ถ่านชีวภาพที่มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น ในการตัดแปรนั้นมีทั้งการตัดแปรทางเคมีและทางกายภาพ สำหรับการตัดแปรทางเคมีนั้นเป็นการเพิ่มปริมาณออกซิเจนบนผิวถ่านเพื่อทำให้ถ่านมีขี้และเข้ากับน้ำได้ง่ายขึ้นที่เรียกว่า การเกิดออกซิเดชันทางเคมี หรือการลดกลุ่มฟังก์ชันบนผิวถ่านที่เรียกว่า การเกิดรีดักชันทางเคมี นอกจากนี้ยังมีวิธีการตัดแปรอื่น ๆ เช่น การเคลือบด้วยโลหะออกไซด์ การใช้พลาสติก การใช้โอโซน เป็นต้น แต่อาจยังไม่เป็นที่นิยมมากนักเนื่องจากอาจมีข้อจำกัดของการใช้เครื่องมือ และต้นทุนสูง โดยกลไกการกำจัดมลพิษของถ่านชีวภาพนั้นสามารถเกิดได้หลายรูปแบบทั้งการดูดซับทางกายภาพ การแลกเปลี่ยนประจุ การใช้ไฟฟ้าสถิต การตกตะกอน เป็นต้น

จากการศึกษาเอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในเบื้องต้น ชีวมวลสามารถนำมาเป็นวัสดุสำหรับการผลิตถ่านชีวภาพด้วยกระบวนการไพโรไลซิสในช่วงอุณหภูมิ ในช่วง 300-700 องศาเซลเซียส เมื่อนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับกรดไขมันอิสระพบว่าสามารถช่วยลดปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันได้ดี และจะเกิดการดูดซับได้ดียิ่งขึ้นหากถ่านชีวภาพผ่านการตัดแปรด้วยสารเคมี ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการเตรียมถ่านชีวภาพจากชังข้าวโพด โดยกระบวนการไพโรไลซิส และตัดแปรด้วยสารเคมีทั้งกรดและด่าง เพื่อก่อให้เกิดรูพรุนเพิ่มขึ้นสำหรับนำไปใช้ในการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชได้ดียิ่งขึ้น เพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตไบโอดีเซล จึงเป็นทางเลือกหนึ่งของการส่งเสริมการนำของเสียมายาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาที่มุ่งปรับปรุงสมบัติของถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดสำหรับการลดกรดปาล์มมิติกน้ำมันปาล์ม ซึ่งมีขั้นตอนที่ประกอบด้วย การเตรียมวัตถุดิบตั้งต้น การผลิตถ่านชีวภาพซังข้าวโพดด้วยกระบวนการไพโรไลซิส การศึกษาลักษณะของถ่านชีวภาพซังข้าวโพด และการดูดซับกรดไขมันอิสระ กรดปาล์มมิติกในน้ำมันพืชด้วยถ่านชีวภาพซังข้าวโพด

การเตรียมวัตถุดิบ

ซังข้าวโพด

ซังข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เป็นส่วนที่เหลือจากการนำเมล็ดข้าวโพดไปใช้ประโยชน์แล้วซึ่งนำมาจากอำเภอแม่แจ่ม จังหวัดเชียงใหม่ สายพันธุ์ NK6253 นำมาตากแดด 3-4 วัน เพื่อกำจัดความชื้นโดยการตากแดด จนมีความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 3.1 ซังข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

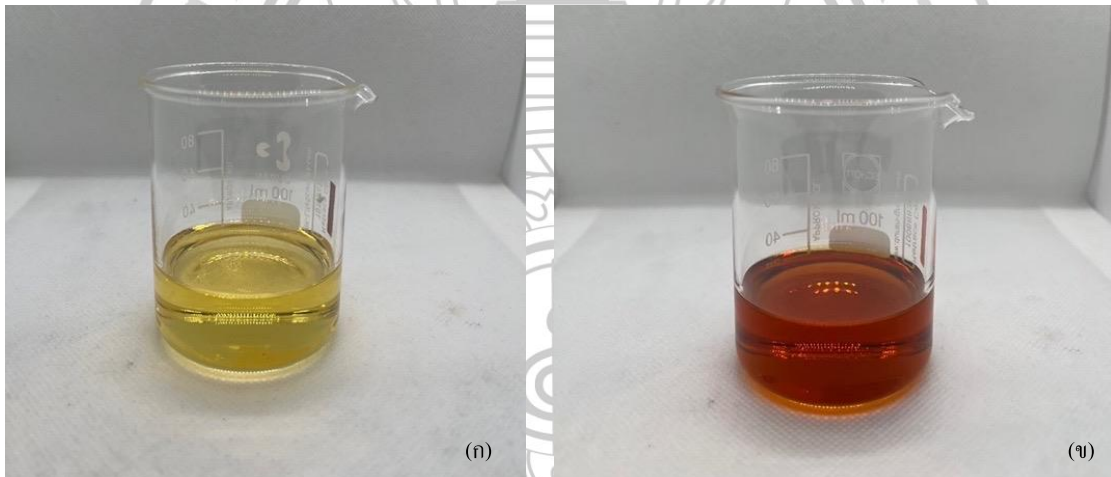
น้ำมันพืช

1. น้ำมันพืชสำหรับใช้ในการทำวิจัย

น้ำมันพืชที่ใช้ในกระบวนการทำการวิจัยเป็นน้ำมันปาล์มโอเลอินที่จำหน่ายตามท้องตลาด มีปริมาณกรดไขมันอิสระร้อยละ 2 นำมาเติมกรดไขมันชนิดกรดปาล์มมิติก และตรวจสอบค่าความเป็นกรดด้วยวิธีการไทเทรชันจนมีค่าความเป็นกรดที่ร้อยละ 5

2. น้ำมันพืชสำหรับการทดสอบตามสภาพจริง

น้ำมันพืชที่ใช้สำหรับการทดสอบตามสภาพจริงเป็นน้ำมันพืชที่ใช้แล้วจากการทอดซ้ำของร้านค้าในชุมชนบริเวณใกล้เคียงวิทยาลัยพัฒนาเศรษฐกิจและเทคโนโลยีชุมชนแห่งเอเชีย มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ ศูนย์แมริม ซึ่งมีปริมาณกรดไขมันอิสระประมาณร้อยละ 5



ภาพที่ 3.2 น้ำมันที่ใช้ในงานวิจัย

(ก) น้ำมันปาล์มโอเลอิน และ (ข) น้ำมันพืชใช้แล้ว

การดำเนินงานวิจัย

การผลิตถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดด้วยกระบวนการอย่างง่าย เพื่อใช้สำหรับลดกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์ม สามารถแบ่งงานวิจัยออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 การเตรียมถ่านชีวภาพซังข้าวโพด ด้วยกระบวนการเผาอย่างง่าย

ขั้นตอนที่ 1 การศึกษาสมบัติของซังข้าวโพดแห้งก่อนทำการเผา

การศึกษาสมบัติซังข้าวโพดแห้งก่อนทำก่อนเผา โดยนำซังข้าวโพดที่ลดความชื้นให้เหลือน้อยกว่าร้อยละ 15 มาทำการบดให้มีขนาด 1 มิลลิเมตร ด้วยตะแกรงขนาด 20 mesh เพื่อศึกษาสมบัติทางเคมี ประกอบด้วย การวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) และการศึกษาวิเคราะห์

แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุภายในซังข้าวโพด และศึกษาสมบัติทางความร้อน ซึ่งเป็นการวิเคราะห์เสถียรของวัสดุเมื่อได้รับความร้อน โดยงานวิจัยนี้วิเคราะห์ด้วยเทคนิค Thermo gravimetric analysis (TGA) ผลการวิเคราะห์จะถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาการผลิตถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด

ขั้นตอนที่ 2 การเตรียมถ่านชีวภาพซังข้าวโพด

นำซังข้าวโพดที่ลดความชื้นให้เหลือน้อยกว่าร้อยละ 15 เพื่อทำการเผาด้วยกระบวนการไพโรไลซิส ด้วยเตาขนาด 50 ลิตร เป็นเวลา 35 นาที ในสภาวะไร้ออกซิเจน จากนั้นทำการล้างถ่านชีวภาพซังข้าวโพดด้วยน้ำกลั่นจนกว่าน้ำที่ออกแช่ถ่านชีวภาพซังข้าวโพดจะมีค่า pH เท่ากับ 7 ทำการอบถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ล้างทำความสะอาดแล้วในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส และทำการบด ร่อนด้วยตะแกรงขนาด 60 mesh (0.25 มิลลิเมตร)

ขั้นตอนที่ 3 ศึกษาการดัดแปรสมบัติของถ่านชีวภาพ ด้วยสารเคมี

ถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ผลิตได้ในข้างต้นจะถูกนำมาปรับปรุงสมบัติ โดยการฝังตัวแบบแห้ง (dry impregnation) โดยการนำถ่านมาแช่กับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) ที่ระดับความเข้มข้น 0.1, 0.5, 1, 2, 4 และ 6 M และนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำไปเผาด้วยเตา muffle furnace ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง รอให้เย็นลงตามอุณหภูมิห้อง และล้างถ่านชีวภาพที่ดัดแปรด้วยสารเคมีด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งน้ำที่ไหลผ่านถ่านจะมีค่า pH เท่ากับ 7 อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง

ขั้นตอนที่ 4 การวิเคราะห์คุณลักษณะของซังข้าวโพด และถ่านชีวภาพซังข้าวโพด

การวิเคราะห์คุณลักษณะของซังข้าวโพดมี 7 รูปแบบ ประกอบด้วย

1. การศึกษาโครงสร้างทางกายภาพ ด้วยการวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์หาค่าความชื้น (moisture) ปริมาณสารระเหย (volatile matter) เถ้า (ash) และคาร์บอนคงตัว (fixed carbon) ตามมาตรฐาน ASTM D 3172-3174

2. การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุภายในซังข้าวโพด แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) ประกอบด้วย ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ (C, H, O, N และ S) ตามมาตรฐาน ASTM D 3176 ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ CHNS ซึ่งเป็นการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุภายในซังข้าวโพด

3. การศึกษาสมบัติทางความร้อนของซังข้าวโพด ด้วยเทคนิค thermo gravimetric analysis (TGA) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์เสถียรของวัสดุเมื่อได้รับความร้อน การวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของซังข้าวโพดตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในสภาวะควบคุม การทดสอบนี้จะเพิ่มอุณหภูมิของตัวอย่างซังข้าวโพดอย่างช้าๆ เพื่อดูการสูญเสียน้ำหนักที่เกิดจากการระเหยของน้ำ และการสลายตัวของส่วนประกอบที่ต่างกัน เช่น เซมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน และการออกซิเดชันของสารอินทรีย์ที่เหลืออยู่ โดยใช้อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้สภาวะแก๊สไนโตรเจน

4. การดูดซับเลขไอโอดีนเป็นค่าที่บอกถึงประสิทธิภาพ และความสามารถในการดูดซับสารของถ่านที่มีโมเลกุลต่ำ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D46-7-94 (ภาคผนวก ก) การหาค่าการดูดซับไอโอดีนเริ่มจากการนำถ่านชีวภาพมาทำการบดและร่อนด้วยตะแกรงขนาด 100 mesh เติมน้ำละลายไอโอดีน และไทเทรชันด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมไธโอซัลเฟตจนสารละลายเปลี่ยนเป็นไม่มีสี

5. ลักษณะทางสัณฐานวิทยาและขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง ด้วยเทคนิค scanning electron microscopy (SEM) ศึกษาโครงสร้างและวิเคราะห์พื้นผิวของตัวอย่าง โดยการนำแท่นทองเหลือง ที่เรียกว่า stub ติดด้วยเทปคาร์บอนที่ด้านหนึ่งติดกับ stub ส่วนอีกด้านหนึ่งติดกับตัวอย่าง และทำการเคลือบด้วยทองคำก่อนทำการวิเคราะห์

6. ลักษณะพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุน ด้วยเทคนิค brunauer emmett-teller (BET) โดยนำตัวอย่างอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมงและนำไปทดสอบด้วยเครื่อง BET โดยทำการดูดซับด้วยแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียสซึ่งใช้การวัดปริมาตรแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับไว้ที่ตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิว และความพรุนของตัวอย่าง

7. โครงสร้างทางเคมี และหมู่ฟังก์ชัน ด้วยเทคนิค fourier transform infrared spectrophotometry (FTIR) ซึ่งใช้หาหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์ด้วยรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า โดยนำตัวอย่างบดผสมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) ให้เป็นเนื้อเดียวกันแล้วอัดให้เป็นแผ่น จากนั้นทดสอบในช่วงคลื่น $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$

ส่วนที่ 2 การดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์ม ด้วยถ่านชีวภาพซังข้าวโพด

ขั้นตอนที่ 1 การศึกษาการดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์ม ด้วยถ่านชีวภาพซังข้าวโพด

การศึกษาการดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์มด้วยถ่านชีวภาพเป็นการศึกษาเปรียบเทียบการดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์ม ด้วยถ่านชีวภาพที่ไม่ผ่านการตัดแปร กับถ่าน

ชีวภาพที่ตัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และถ่านชีวภาพที่ผ่านการคัดแปรกรดฟอสฟอริก นำน้ำมันปาล์มเติมกรดปาล์มมิดิก จนมีค่ากรดไขมันอิสระร้อยละ 5 และตรวจสอบค่ากรดไขมันอิสระโดยวิธีการไทเทรชันด้วยวิธีมาตรฐาน AOCS Ca 5a-40 (ภาคผนวก ข) (Firestone, 2004) โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และใช้ฟีนอล์ฟทาลินเป็นอินดิเคเตอร์ คำนวณปริมาณกรดปาล์มมิดิกในน้ำมันปาล์ม จากสมการที่ 3.1 ทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับ คือ เวลาในการดูดซับ ปริมาณถ่านชีวภาพซังข้าวโพด อุณหภูมิในการดูดซับ นำผลที่ได้มาเขียนไอโซเทอร์มของการดูดซับ จลนพลศาสตร์ และอุณหพลศาสตร์

สมการ

$$FFA (\%) = \frac{25.6 \times V \times N}{W_{oil}} \quad (3.1)$$

เมื่อ V คือ ปริมาตรสารละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรชัน (mL)

N คือ ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (N)

W_{oil} คือ น้ำหนักของน้ำมันที่ใช้ (g)

การศึกษาผลของปัจจัยข้างต้น สามารถคำนวณประสิทธิภาพการดูดซับ และค่าสมมูลของการดูดซับหรือความสามารถในการดูดซับ (Phetrungnapha, A. et, al., 2023; อติศักดิ์ คีรีรักษ์, 2561) จากสมการที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ ดังนี้

สมการ

$$\text{Removal} = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \quad (3.2)$$

$$q = \frac{C_0 - C_e}{W} \times V \quad (3.3)$$

เมื่อ q คือ ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)

C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดไขมันอิสระในน้ำมัน (mg/L)

- C_e คือ ความเข้มข้นที่จุดสมดุลของกรดไขมันอิสระหลังการดูดซับ (mg/L)
 V คือ ปริมาตรของน้ำมัน (mL)
 W คือ น้ำหนักของถ่านดูดซับ (mg)

1. การศึกษาเวลาในการดูดซับกรดปาล์มมิติก

นำถ่านชีวภาพที่คัดแปร และไม่ได้คัดแปรปริมาณถ่าน 4 กรัม ทดสอบในน้ำมันปาล์ม ปริมาณ 30 กรัม (ปริมาตร 32.70 มิลลิลิตร) ที่มีกรดไขมันชนิดกรดปาล์มมิติก ร้อยละ 5 โดยมวล ใน ปีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร ตั้งในอ่างน้ำมันควบคุมอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส อัตราการกวนผสม 600 rpm (Changwatchai, T., et al., 2022; Miyuranga, K. A. V., et al., 2023) แสดงดังภาพที่ 3.3 โดยใช้ระยะเวลาในการดูดซับเริ่มต้นที่ 30 - 360 นาที รอให้เย็น ณ อุณหภูมิห้อง ทำการแยกผงถ่านออก ด้วยวิธีการกรองโดยชุดกรองแบบสุญญากาศพร้อมตรวจสอบค่ากรดไขมันอิสระโดยวิธีการไทเทรชันตามมาตรฐาน AOCS Ca 5a-40 (ภาคผนวก ข) คำนวณปริมาณกรดไขมันอิสระจาก สมการที่ 3.1 และศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ เพื่อสร้างแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง เทียม (Pseudo-first order) และจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม (Pseudo-second order) โดยใช้ สมการที่ 2.14 และ 2.16 ตามลำดับ โดยพิจารณาค่าสัมพันธภาพของสมการถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Correlation, R^2) โดยแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) จะเป็นการสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง $1/q_t$ และ t จะได้ความชันจากกราฟเท่ากับ $1/q_e$ และเกิดจุดตัด ที่แกน y เท่ากับ $1/k_2 q_e^2$ ส่วนแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม (Pseudo-second order) จะเป็นการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(q_e - q_t)$ และ t จะได้กราฟเส้นตรง ซึ่ง k_1 และ q_e นั้น จะได้จากความชันและจุดตัดของกราฟ ตามลำดับ โดยสมการจากแบบจำลองทั้งสองจะใช้อธิบาย ความสามารถในการดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ

สมการ

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad (2.14)$$

$$\frac{1}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (2.16)$$



ภาพที่ 3.3 การดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์ม ด้วยถ่านชีวภาพซังข้าวโพด

2. การศึกษาปริมาณถ่านชีวภาพในการดูดซับกรดปาล์มมิติก

นำถ่านชีวภาพที่ตัดแปร และไม่ได้ตัดแปรปริมาณถ่าน 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม ทดสอบในน้ำมันปาล์มปริมาณ 30 กรัม (ปริมาตร 32.70 มิลลิลิตร) ที่มีกรดไขมันชนิดกรดปาล์มมิติก ร้อยละ 5 โดยมวล ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร ตั้งในอ่างน้ำมันควบคุมอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส อัตราการกวนผสม 600 rpm (Changwatchai, T., et al., 2022; Miyuranga, K. A. V., et al., 2023) เวลาในการศึกษา ที่ได้จากการทดลองในข้อที่ 1. รอให้เย็น ณ อุณหภูมิห้อง ทำการแยกถ่านออกด้วยวิธีการกรองโดยชุดกรองแบบสุญญากาศพร้อมตรวจสอบค่ากรดไขมันอิสระโดยวิธีการไทเทรชันตามมาตรฐาน AOCS Ca 5a-40 (ภาคผนวก ข) คำนวณปริมาณกรดไขมันอิสระจากสมการที่ 3.1 และศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับที่เป็นการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณถ่านในการดูดซับกับความเข้มข้นของสารที่จุดสมดุลที่อุณหภูมิคงที่ โดยใช้สมการที่ 2.6-2.9 เพื่อสร้างสมการอธิบายการดูดซับแบบแลงเมียร์ และฟรุนดลิช ตามลำดับ เพื่อสร้างสมการทั้งในรูปแบบสมการเส้นตรง (Linear) และสมการที่ไม่เป็นเส้นตรง (Non-Linear) ซึ่งสมการการดูดซับแบบแลงเมียร์นั้นสามารถคำนวณหาปริมาณการดูดซับสูงสุด (q_m) และค่าคงที่ของแลงเมียร์ (b) ได้จากกราฟจุดตัดแกน y และความชันของกราฟ ตามลำดับ ส่วนสมการฟรุนดลิชสามารถหาค่าคงที่ของฟรุนดลิช (K_F) และค่าแฟกเตอร์ความแตกต่างของพื้นผิวตัวดูดซับ ($1/n$) จากค่าจุดตัดแกน y และความชันของกราฟตามลำดับ

สมการ

$$q_e = \frac{bq_m C_e}{(1+bC_e)} \quad (2.6)$$

- เมื่อ q_e คือ ปริมาณของสารถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักสารดูดซับ (mg/g)
 b คือ ค่าคงที่แลงเมียร์ที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ
 q_m คือ ปริมาณสารถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับสูงสุด (mg/g)
 C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่สภาวะสมดุล (mg/l)

$$\log q_e = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e \quad (2.9)$$

3. การศึกษาอุณหภูมิที่ส่งผลต่อการดูดซับกรดปาล์มมิติก

นำปริมาณถ่านชีวภาพที่ดัดแปร และไม่ได้ดัดแปร ตามการศึกษาดังข้อที่ 2 มาทำการทดสอบในน้ำมันปาล์มปริมาณ 30 กรัม (ปริมาตร 32.70 มิลลิลิตร) ที่ที่มีกรดไขมันชนิดกรดปาล์มมิติก ร้อยละ 5 โดยมวล ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร ตั้งในอ่างน้ำมันควบคุมอุณหภูมิตามเวลาที่ศึกษาดังข้อที่ 1. โดยใช้อุณหภูมิในการดูดซับ 30, 45 และ 60 องศาเซลเซียส อัตราการกวนผสม 600 rpm (Changwatchai, T., et al., 2022; Miyuranga, K. A. V., et al., 2023) รอให้เย็น ณ อุณหภูมิห้อง ทำการแยกผงถ่านออกด้วยวิธีการกรองโดยชุดกรองแบบสุญญากาศพร้อมตรวจสอบค่ากรดไขมันอิสระโดยวิธีการไทเทรชันตามมาตรฐาน AOCS Ca 5a-40 (ภาคผนวก ข) และอุณหภูมิศาสตร์ของการดูดซับ เพื่อใช้อธิบายถึงความสามารถในการเกิดขึ้นได้เองของกระบวนการดูดซับ โดยศึกษาผลของอุณหภูมิของการดูดซับแล้วนำผลดังกล่าวมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log K_c$ และ T โดยใช้สมการที่ 2.19 เพื่อคำนวณหาค่า ΔH^0 และ ΔS^0 จากความชันของกราฟ และค่าจุดตัดแกน y ตามลำดับ และนำค่ามาคำนวณค่า ΔG^0 เพื่อใช้วิเคราะห์ผลทางอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ

สมการ

$$\log K_c = \frac{\Delta S^0}{2.303 R} - \frac{\Delta H^0}{2.303 RT} \quad (2.19)$$

- เมื่อ ΔG^0 คือ พลังงานอิสระของกิบส์เฉลี่ย (kJ/mol)
 ΔH^0 คือ การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปี (kJ/mol)
 ΔS^0 คือ การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (J/mol.K)

- R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 J/mol.K)
T คือ อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน (K)
 K_c คือ ค่าคงที่สมดุลการดูดซับ
 C_{ac} คือ ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในตัวดูดซับ (mg/L)
 C_c คือ ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในสารละลาย (mg/L)

ขั้นตอนที่ 2 การศึกษาตามสภาพจริง

ในขั้นตอนของการศึกษาตามสภาพจริงจะเป็นการศึกษาการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชใช้แล้ว ซึ่งเป็นน้ำมันที่ผ่านการใช้งานซ้ำที่ถูกรวบรวมจากร้านค้าบริเวณใกล้เคียง โดยเริ่มจากการนำน้ำมันพืชใช้แล้วมาวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระด้วยวิธีการไทเทรชัน จากนั้นทำการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยใช้เงื่อนไขของการทดลองที่มีผลการดูดซับดีที่สุด



บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล และอภิปรายผล

จากการศึกษาวิจัยการผลิตถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดด้วยกระบวนการอย่างง่าย เพื่อใช้สำหรับลดกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์ม ซึ่งมีผลการวิเคราะห์ 3 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและทางกายภาพ ส่วนที่ 2 การตัดแปรสมบัติของถ่านชีวภาพด้วยสารเคมี และส่วนที่ 3 การดูค่ากรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์มด้วยถ่านชีวภาพซังข้าวโพด โดยมีรายละเอียดดังนี้

ในการศึกษาวิจัยนี้ ได้มีการกำหนดตัวย่อ และความหมายที่ใช้ในงานวิจัย ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 อักษรย่อ และความหมายที่ใช้ในงานวิจัย

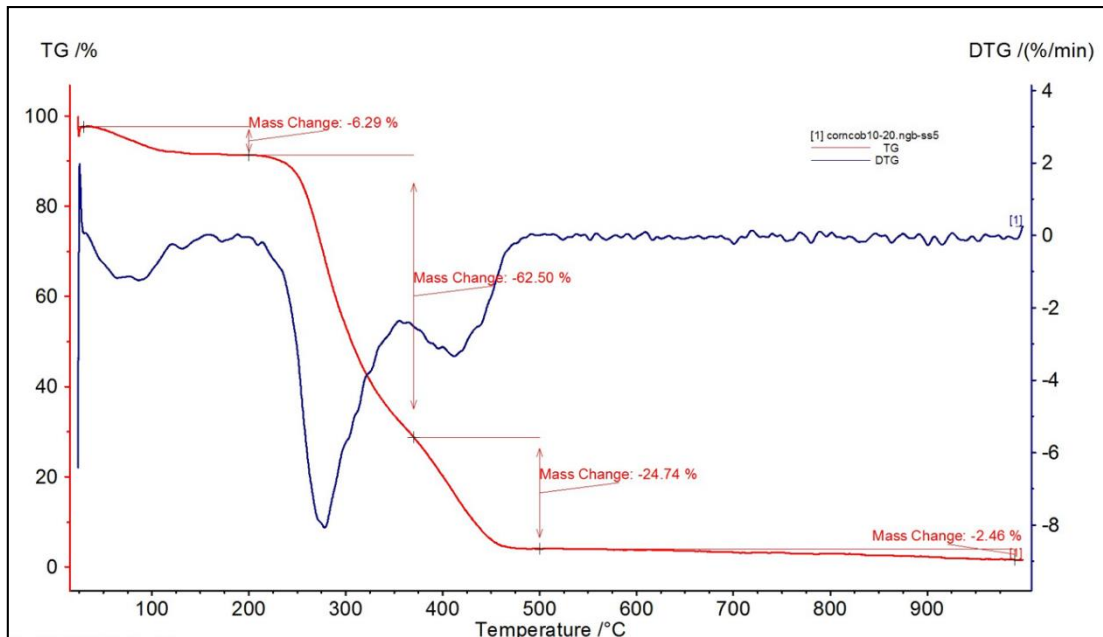
| อักษรย่อ | ความหมาย |
|--|--|
| CC | ซังข้าวโพด |
| CCB | ถ่านชีวภาพซังข้าวโพด |
| CCB-500 | ถ่านชีวภาพซังข้าวโพด เผาด้วยอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส |
| CCB -KOH 0.1 M | ถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ตัดแปรด้วย โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.1 M |
| CCB -KOH 0.5 M | ถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ตัดแปรด้วย โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.5 M |
| CCB -KOH 1 M | ถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ตัดแปรด้วย โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1 M |
| CCB -KOH 2 M | ถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ตัดแปรด้วย โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 2 M |
| CCB -KOH 4 M | ถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ตัดแปรด้วย โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 4 M |
| CCB -KOH 6 M | ถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ตัดแปรด้วย โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 6 M |
| CCB - H ₃ PO ₄ 0.1 M | ถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ตัดแปรด้วย กรดฟอสฟอริก ความเข้มข้น 0.1 M |
| CCB - H ₃ PO ₄ 0.5 M | ถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ตัดแปรด้วย กรดฟอสฟอริก ความเข้มข้น 0.5 M |
| CCB - H ₃ PO ₄ 1 M | ถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ตัดแปรด้วย กรดฟอสฟอริก ความเข้มข้น 1 M |
| CCB - H ₃ PO ₄ 2 M | ถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ตัดแปรด้วย กรดฟอสฟอริก ความเข้มข้น 2 M |
| CCB - H ₃ PO ₄ 4 M | ถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ตัดแปรด้วย กรดฟอสฟอริก ความเข้มข้น 4 M |
| CCB - H ₃ PO ₄ 6 M | ถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ตัดแปรด้วย กรดฟอสฟอริก ความเข้มข้น 6 M |

การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของซังข้าวโพด และถ่านชีวภาพซังข้าวโพด

การศึกษาสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของซังข้าวโพด ถ่านซังข้าวโพด และถ่านซังข้าวโพดตัดแปรด้วยสารเคมี โดยแบ่งการวิเคราะห์ที่ได้ดังนี้

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค thermo gravimetric analysis (TGA)

การศึกษาสมบัติทางความร้อนของซังข้าวโพดด้วยเทคนิค thermo gravimetric analysis (TGA, PerkinElmer, รุ่น Pyris 1) เป็นการวิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุเมื่อได้รับความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 40-900 องศาเซลเซียส และมีการใช้อัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ดังภาพที่ 4.1 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักตามอุณหภูมิ โดยสามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้ ในขั้นแรกที่ช่วงอุณหภูมิ 40-100 องศาเซลเซียส เป็นช่วงที่ความชื้นภายในซังข้าวโพดเกิดการระเหย และมีอัตราการสูญเสียน้ำหนักประมาณร้อยละ 6.29 ในขั้นที่สองที่ช่วงอุณหภูมิ 250-400 องศาเซลเซียส เป็นช่วงที่เฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสมีการสลายตัว และมีอัตราการสูญเสียน้ำหนักประมาณร้อยละ 62.50 ส่วนในขั้นตอนสุดท้ายเกิดขึ้นที่ช่วงอุณหภูมิสูงกว่า 400 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการสลายตัวของลิกนินที่มีความทนทานต่อความร้อนมากขึ้น และมีอัตราการสูญเสียน้ำหนักประมาณร้อยละ 24.74 โดยผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Fong, Yuk, Moi., Rozidaini, Mohd, Ghazi., Mohd, Zazmiezi, Mohd, Alias. (2020) ซึ่งศึกษาสมบัติทางความร้อนของซังข้าวโพดด้วยเทคนิค TGA ซึ่งแสดงให้เห็นว่าซังข้าวโพดเกิดการสูญเสียมวลหลังจากอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส การสลายตัวด้วยความร้อนหลักของซังข้าวโพดดิบนั้นเกิดจากเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนินที่อยู่ภายใน โดยอุณหภูมิในการไพโรไลซิสของเฮมิเซลลูโลสคือ 200-280 องศาเซลเซียส เซลลูโลสที่ 280-380 องศาเซลเซียส และลิกนินที่ 380-500 องศาเซลเซียส โดยจากกราฟ TGA ในการศึกษาครั้งนี้ของซังข้าวโพดแสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นช่วงที่ทำให้เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และน้ำมันดิน (tar) เกิดการสลายตัวได้ดียิ่งขึ้น ช่วงอุณหภูมิดังกล่าวจึงเป็นช่วงเหมาะสมแก่การผลิตถ่านชีวภาพซังข้าวโพด



ภาพที่ 4.1 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของซังข้าวโพด

การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (proximate analysis)

การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (proximate analysis) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์หาค่าความชื้น สารระเหย เถ้า และคาร์บอนคงตัว ซึ่งเป็นการวิเคราะห์เพื่อศึกษาโครงสร้างทางกายภาพ ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่าซังข้าวโพดมีความชื้นและสารระเหยสูงกว่าถ่านชีวภาพซังข้าวโพด ซึ่งสารระเหยนั้นแสดงถึงการมีอยู่ของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินที่อยู่ภายในซังข้าวโพด แต่เมื่อได้รับความร้อนจากกระบวนการไพโรไลซิสสารระเหยภายในซังข้าวโพดจะมีค่าลดลง ส่วนปริมาณเถ้า และคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น เนื่องจากความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้จะไปสลายเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ในชีวมวลซังข้าวโพด เมื่อได้รับความร้อนจากการเผาไหม้ทาร์หรือน้ำมันดินที่เกาะติดอยู่กับรูพรุนหรือพื้นผิวของซังข้าวโพดจะเกิดการสลายตัว (Ronsse, F., Hecke, S.V., Dickinson, D., & Prins, W., 2013) ซึ่งผลการวิเคราะห์สอดคล้องกับงานวิจัยของ Praphatsorn, Rattanaphai boon (2022) และ Drané, M. (2024) พบว่าที่อุณหภูมิการเผา 500 องศาเซลเซียส จะทำให้ถ่านซังข้าวโพดมีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงถึงร้อยละ 78.86 ปริมาณเถ้าเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 5.77 และมีค่าความชื้น และปริมาณสารระเหยร้อยละ 4.61 และ 10.76 ตามลำดับ และสอดคล้องกับ Adekanye et al., (2022) ที่มีศึกษาอุณหภูมิของการผลิตถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด โดยพบว่าหากอุณหภูมิการเผาไหม้เพิ่มขึ้นปริมาณของถ่านชีวภาพที่ได้จะลดลงเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงจนเกินไปจะทำให้เกิดเป็นเถ้าค่อนข้างมาก

สำหรับถ่านชีวภาพที่ตัดแปรด้วยสารเคมีนั้นพบว่าปริมาณคาร์บอนคงตัวลดลง ปริมาณเถ้าและสารระเหยเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านชีวภาพที่ไม่ได้ทำการตัดแปร เนื่องจาก สารเคมีที่ใช้ในการตัดแปรถ่านชีวภาพนั้นส่งผลให้พื้นที่ผิวของถ่านเพิ่มขึ้น ทำให้เพิ่มความพรุน และสามารถดูดซับได้ดีขึ้น ซึ่งเป็นลักษณะของตัวดูดซับที่ดี (Zhang, Q., Wang, Y., Xue, Z., Li, J., Liu, L., Zhang, W., & Zhou, J.,2021)

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของซังข้าวโพด และถ่านชีวภาพซังข้าวโพด

| ตัวอย่าง | องค์ประกอบ (ร้อยละโดยมวล) | | | | อ้างอิง |
|--|---------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------------|
| | ความชื้น | สารระเหย | เถ้า | คาร์บอนคงตัว | |
| CC | 11.45 | 83.23 | 2.4 | 2.92 | Praphatsorn (2022) |
| CCB | 1.78 | 33.05 | 6.13 | 59.04 | Praphatsorn (2022) |
| CCB | 4.17 | 75.96 | 1.36 | 18.51 | Drané, M. (2024) |
| CCB-500 | 2.14 | 14.28 | 4.39 | 79.18 | Drané, M. (2024) |
| CC | 11.89 ± 0.41 | 73.37 ± 1.03 | 1.17 ± 1.55 | 11.57 ± 1.31 | การศึกษาคั้งนี้ |
| CCB-500 | 4.61 ± 0.63 | 10.76 ± 1.44 | 5.77 ± 1.81 | 78.86 ± 1.26 | การศึกษาคั้งนี้ |
| CCB - KOH 4 M | 8.1 ± 1.37 | 11.38 ± 0.90 | 9.49 ± 1.86 | 71.03 ± 1.01 | การศึกษาคั้งนี้ |
| CCB - H ₃ PO ₄ 2 M | 7.9 ± 1.06 | 15.33 ± 0.52 | 10.12 ± 1.22 | 66.65 ± 0.93 | การศึกษาคั้งนี้ |

การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (ultimate analysis)

การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (ultimate analysis) ประกอบด้วย ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ (C, H, O, N และ S) ภายในของซังข้าวโพด และถ่านชีวภาพซังข้าวโพด ผลการวิเคราะห์ที่แสดงดังตารางที่ 4.3 พบว่า ซังข้าวโพดมีธาตุคาร์บอนร้อยละ 48.45 เมื่อผ่านการเผาไหม้ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสถ่านซังข้าวโพดจะมีธาตุคาร์บอนเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 81.16 ในขณะเดียวกันจะมีปริมาณของธาตุไฮโดรเจนและออกซิเจนลดลงเหลือร้อยละ 0.28 และ 16.95 ตามลำดับ ซึ่งผลการวิเคราะห์สอดคล้องกับงานวิจัยของ Praphatsorn, Rattanaphai boon (2022) และ Adekanye et, al., (2022) ที่พบว่าปริมาณไฮโดรเจนและออกซิเจนจะลดลงเมื่ออุณหภูมิในการไพโรไลซิสสูงขึ้น เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นนั้น ไปสลายพันธะออกซิเจน ทำให้ไฮโดรเจนและออกซิเจนมีปริมาณลดลง

สำหรับถ่านชีวภาพที่ดัดแปรด้วยสารเคมีนั้นพบว่า มีธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ และออกซิเจนเทียบเท่ากับถ่านชีวภาพที่ไม่ได้ทำการดัดแปร ซึ่งไฮโดรเจนและออกซิเจนนั้นเป็นหมู่ฟังก์ชันที่เกิดจากความชื้น ปริมาณความชื้นนั้นส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มลดลง

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของซังข้าวโพด และถ่านชีวภาพซังข้าวโพด

| ตัวอย่าง | ค่าการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ร้อยละโดยมวล) | | | | | อ้างอิง |
|--|--|--------------|--------------|--------------|-----------|--------------------|
| | คาร์บอน (C) | ไฮโดรเจน (H) | ไนโตรเจน (N) | ซัลเฟอร์ (S) | ออกซิเจน* | |
| CC | 44.76 | 5.89 | 0.52 | 0.04 | 43.99 | Praphatsorn (2022) |
| CCB | 71.49 | 3.06 | 0.85 | 0.03 | 10.26 | Praphatsorn (2022) |
| CC | 48 | 6.04 | 0.77 | 0.14 | 43 | Drané, M. (2024) |
| CCB | 84.60 | 2.80 | 0.88 | 0.11 | 4.98 | Drané, M. (2024) |
| CC | 48.45 ± 0.77 | 5.86 ± 0.01 | 0.25 ± 0.02 | 0.08 ± 0.01 | 45.36 | การศึกษาครั้งนี้ |
| CCB | 81.16 ± 0.33 | 0.28 ± 0.03 | 1.46 ± 0.03 | 0.14 ± 0.01 | 16.95 | การศึกษาครั้งนี้ |
| CCB -KOH 4 M | 81.57 ± 0.09 | 0.09 ± 0.02 | 1.29 ± 0.02 | 0.15 ± 0.00 | 16.90 | การศึกษาครั้งนี้ |
| CCB - H ₃ PO ₄ 2 M | 81.83 ± 0.18 | 1.34 ± 0.03 | 2.93 ± 0.01 | 0.14 ± 0.00 | 13.76 | การศึกษาครั้งนี้ |

*หมายเหตุ ธาตุออกซิเจนเกิดจากการคำนวณของน้ำหนักธาตุทั้งหมดที่เป็นองค์ประกอบของธาตุ ร้อยละ 100

การดัดแปรสมบัติของถ่านชีวภาพด้วยสารเคมี

ถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ผลิตได้จะนำมาดัดแปรด้วยสารเคมี โดยการฝังตัวแบบแห้ง (dry impregnation) โดยการนำถ่านมาแช่กับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) ที่ระดับความเข้มข้น 0.1, 0.5, 1, 2, 4 และ 6 M การวิเคราะห์คุณสมบัติของซังข้าวโพดมี 3 รูปแบบประกอบด้วย

การวิเคราะห์ความพรุนโดยการหาค่าการดูดซับไอโอดีน

ค่าการดูดซับเลขไอโอดีน (Iodine Number) เป็นค่าที่บอกถึงความพรุนของถ่าน และความสามารถในการดูดซับสารของถ่านที่มีโมเลกุลต่ำ การประยุกต์ใช้ถ่านกัมมันต์หรือถ่านชีวภาพ มักต้องมีการพิจารณาค่าการดูดซับไอโอดีนควบคู่ไปกับสมบัติอื่นๆ ของถ่านนั้นด้วย ในประเทศไทยได้กำหนดมาตรฐานสำหรับผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมให้เป็นไปตาม มอก.900-2547 (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2547) ซึ่งกำหนดให้ถ่านกัมมันต์แบบผงละเอียดต้องมีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ไม่น้อยกว่า 600 ในการศึกษาครั้งนี้จะทำการพิจารณาถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ดัดแปรด้วยสารเคมีที่มีประสิทธิภาพของการดูดซับไอโอดีนที่ดีที่สุดไปใช้ในการวิเคราะห์สมบัติอื่นๆ ต่อไป

จากการทดสอบการดูดซับไอโอดีนตามมาตรฐาน ASTM D46-7-94 โดยใช้ถ่านซังข้าวโพดที่ไม่ได้ดัดแปร และถ่านซังข้าวโพดที่ดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการดูดซับไอโอดีนของซังข้าวโพด ถ่านซังข้าวโพด ถ่านซังข้าวโพดดัดแปรด้วยสารเคมี

| ตัวอย่าง | ไอโอดีนนัมเบอร์ (มิลลิกรัมต่อกรัม) |
|-----------------------|------------------------------------|
| CC | สีของไอโอดีนไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง |
| CCB | 389.09 ± 3.46 |
| CCB -KOH 0.1 M | 530.12 ± 2.59 |
| CCB -KOH 0.5 M | 561.95 ± 3.11 |
| CCB -KOH 1 M | 589.86 ± 4.01 |
| CCB -KOH 2 M | 593.26 ± 3.20 |
| CCB -KOH 4 M | 663.11 ± 3.92 |
| CCB -KOH 6 M | 674.09 ± 3.19 |
| CCB - H_3PO_4 0.1 M | 519.60 ± 2.95 |

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

| ตัวอย่าง | ไอโอดีนนมเบอร์ (มิลลิกรัมต่อกรัม) |
|--|-----------------------------------|
| CCB - H ₃ PO ₄ 0.5 M | 574.81 ± 2.99 |
| CCB - H ₃ PO ₄ 1 M | 598.58 ± 3.08 |
| CCB - H ₃ PO ₄ 2 M | 659.11 ± 3.11 |
| CCB - H ₃ PO ₄ 4 M | 740.31 ± 2.87 |
| CCB - H ₃ PO ₄ 6 M | 714.86 ± 2.11 |

จากตารางที่ 4.4 ผลการทดลองการดูดซับไอโอดีนพบว่า เมื่อซังข้าวโพด (CC) มีสีของไอโอดีนไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง อาจมีสาเหตุจากซังข้าวโพดไม่มีความพรุนจึงไม่สามารถดูดซับสีของไอโอดีนได้ เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านซังข้าวโพดชีวภาพ (CCB) พบว่ามีค่าไอโอดีนนมเบอร์ที่ 389.09 มิลลิกรัมต่อกรัม แสดงให้เห็นว่าถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ผ่านการเผาด้วยกระบวนการไพโรไลซิสจะมีความพรุนเกิดขึ้นจึงสามารถดูดซับสีของไอโอดีนได้ระดับหนึ่ง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Gotore, O. และคณะ (2022) ที่มีการศึกษาการดูดซับไอโอดีนจากการใช้ถ่านชีวภาพซังข้าวโพดเผาด้วยกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่างกัน โดยพบว่าที่อุณหภูมิการเผาสูงขึ้นจะมีค่าการดูดซับไอโอดีนได้มากยิ่งขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิการไพโรไลซิสที่สูงขึ้นนั้นจะทำให้พื้นที่ผิว และรูพรุนของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ซึ่งสารประกอบที่อยู่ภายในซังข้าวโพดจะเกิดการสลายตัว และเหลือเป็นคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์แบบประมาณก่อนหน้า

สำหรับถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ผ่านการตัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่ความเข้มข้น 0.1, 0.5, 1, 2, 4 และ 6 โมลาร์ นั้นมีค่าไอโอดีนนมเบอร์เพิ่มขึ้น ตามลำดับ โดยพบว่าเมื่อค่าความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เพิ่มขึ้น ค่าไอโอดีนนมเบอร์จะเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าถ่านชีวภาพที่ผ่านการตัดแปรนี้มีความพรุนเพิ่มขึ้น ส่วนถ่านชีวภาพที่ผ่านการตัดแปรด้วยกรดฟอสฟอริก (H₃PO₄) ที่ความเข้มข้น 0.1, 0.5, 1, 2, 4 และ 6 โมลาร์ นั้นมีค่าไอโอดีนนมเบอร์เพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริก (H₃PO₄) เพิ่มขึ้นจาก 0.1-4 โมลาร์ แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดถึง 6 โมลาร์ ค่าไอโอดีนนมเบอร์กลับมีค่าลดลงเล็กน้อย ซึ่งอาจแสดงถึงการอิมตัวของพื้นที่ผิวหรือการลดลงของความพรุนเนื่องจากการอุดตันของรูพรุนจากการแก้ไขสารเคมีที่มากเกินไป

จากผลการศึกษาค่าไอโอดีนนมเบอร์ของถ่านชีวภาพซังข้าวโพด และถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ตัดแปรด้วยสารเคมี พบว่าถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ผ่านการตัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่ความเข้มข้น 4 โมลาร์ มีค่าไอโอดีนนมเบอร์ 663.11 มิลลิกรัม

ต่อกรัม และถ่านชีวภาพที่ผ่านการดัดแปรด้วยกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) ที่ความเข้มข้น 2 โมลาร์ มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ 659.11 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งมีค่าไอโอดีนนัมเบอร์เป็นไปตามมาตรฐานสำหรับผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมให้เป็นไปตาม มอก.900-2547 ที่กำหนดให้ถ่านกัมมันต์หรือถ่านดูดซับต้อง มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ ไม่น้อยกว่า 600 มิลลิกรัมต่อกรัม (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2547) จึงเลือกเงื่อนไขของการศึกษาดังกล่าวไปทำการวิเคราะห์ และศึกษาในขั้นตอนต่อไป

การวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุน

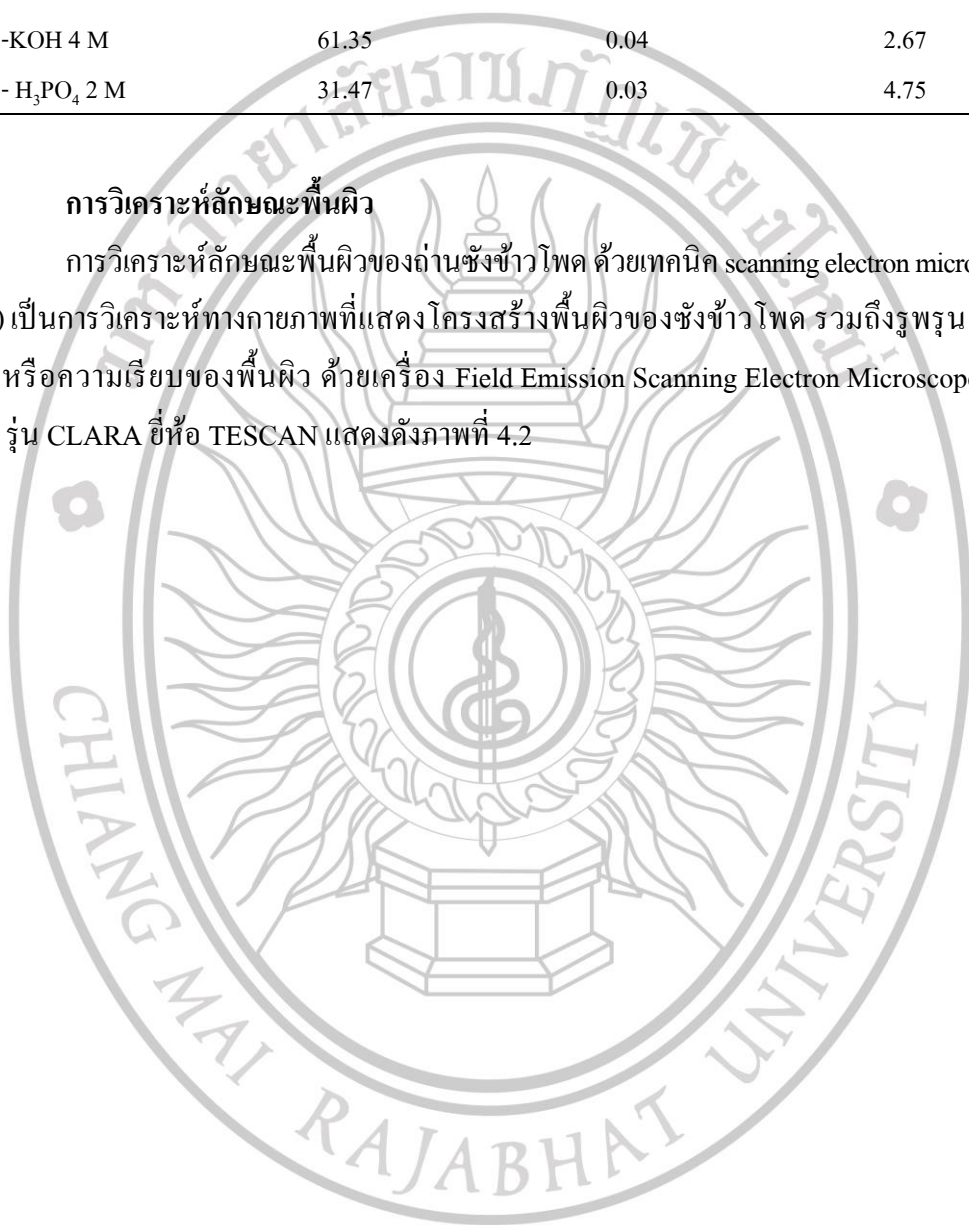
การวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรของรูพรุน เป็นการศึกษาลักษณะทางกายภาพด้วยเทคนิค brunauer emmett-teller (BET) ด้วยเครื่อง Specific surface area analyzer, Belsorp, mini II ซึ่งใช้หลักการดูดซับระหว่างของแข็งกับตัวเร่งปฏิกิริยาและแก๊สไนโตรเจน ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าถ่านซังข้าวโพดที่ไม่ได้ดัดแปร (CCB) ถ่านซังข้าวโพดที่ดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (CCB-KOH) และกรดฟอสฟอริก (CCB- H_3PO_4) มีขนาดของรูพรุนเฉลี่ย 5.09, 2.76 และ 4.75 nm ตามลำดับ ซึ่งมีรูพรุนเป็นขนาดกลาง (mesopores) โดยมีขนาดระหว่าง 2-50 nm (Gwenzi et al., 2021; Sohi et al., 2010) โดยถ่านซังข้าวโพดที่ไม่ได้ดัดแปร (CCB) มีค่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนที่ค่อนข้างต่ำ เมื่อเทียบกับถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และกรดฟอสฟอริก (CCB- H_3PO_4) โดยอาจเกิดจากสารเคมีทำให้เกิดการสร้างรูพรุนบนพื้นที่ผิวของถ่านเพิ่มขึ้น ทั้งนี้พบว่าพื้นที่ผิวของถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) มีค่าสูงกว่าถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ดัดแปรด้วยกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) และถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ไม่ได้ดัดแปร (CCB) ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ก่อนหน้านี้ที่ถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ดัดแปรด้วยสารเคมีด้วยด่าง (KOH) มีค่าสูงกว่าถ่านทั้งสองแบบเช่นกัน เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวจะทำให้โมเลกุลของสารถูกดูดซับเข้าถึงพื้นที่ภายในตัวดูดซับได้ง่ายขึ้น แสดงให้เห็นว่าถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) นั้นมีสามารที่จะดูดซับ หรือการดูดซับบนผิวถ่านได้ดีกว่า

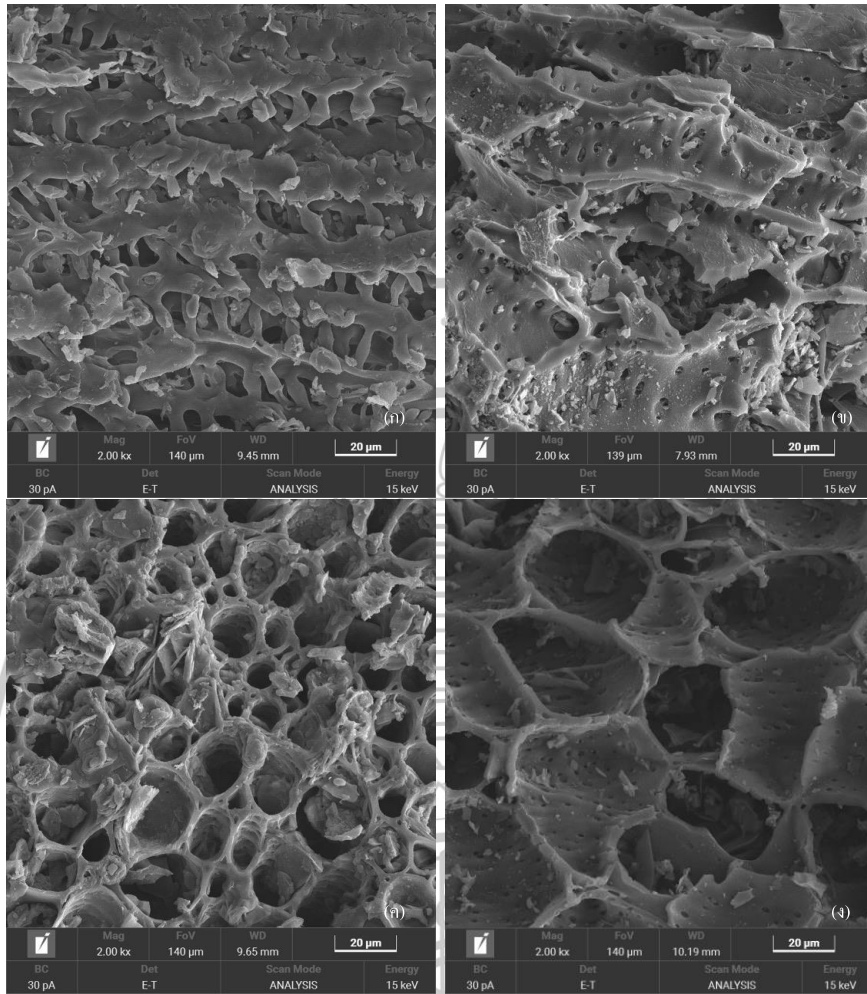
ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของซังข้าวโพด ผ่านชีวภาพซังข้าวโพด

| ตัวอย่าง | พื้นที่ผิว (m ² /g) | ปริมาตรรูพรุน (cm ³ /g) | ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (nm) |
|--|-----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------|
| CCB | 15.78 | 0.02 | 5.09 |
| CCB -KOH 4 M | 61.35 | 0.04 | 2.67 |
| CCB - H ₃ PO ₄ 2 M | 31.47 | 0.03 | 4.75 |

การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิว

การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของถ่านซังข้าวโพด ด้วยเทคนิค scanning electron microscopy (SEM) เป็นการวิเคราะห์ทางกายภาพที่แสดงโครงสร้างพื้นผิวของซังข้าวโพด รวมถึงรูพรุน ความหยาบหรือความเรียบของพื้นผิว ด้วยเครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) รุ่น CLARA ยี่ห้อ TESCAN แสดงดังภาพที่ 4.2





ภาพที่ 4.2

ลักษณะพื้นผิวภายนอกของวัสดุดูดซับ

(ก) ชั่งข้าวโพด (CC), (ข) ถ่านชีวภาพชั่งข้าวโพด (CCB),

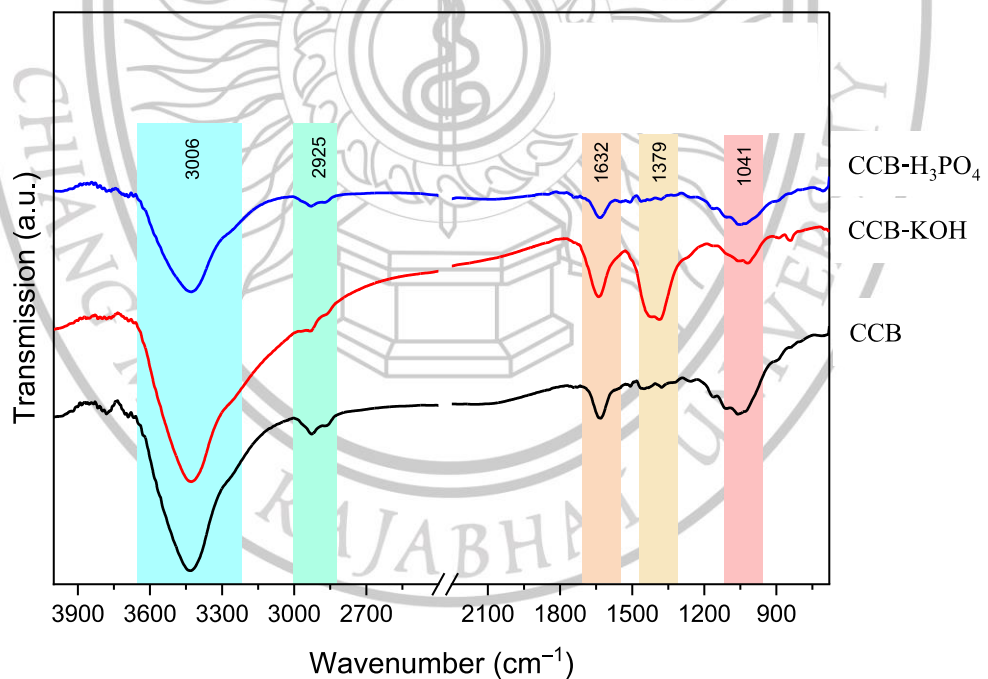
(ค) ถ่านชีวภาพชั่งข้าวโพดตัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (CCB-KOH 4M), (ง) ถ่านชีวภาพชั่งข้าวโพดตัดแปรด้วยกรดฟอสฟอริก (CCB- H₃PO₄ 2M)

จากภาพที่ 4.2 ภาพถ่ายของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน โดยใช้กำลังขยาย 2000 เท่า (ก) ชั่งข้าวโพด (CCB) มีลักษณะเป็นแท่งกลมยาว มีพื้นผิวเรียบที่เป็นลักษณะรูพรุนธรรมชาติ ส่วน (ข) ถ่านชีวภาพชั่งข้าวโพด (CCB) พื้นผิวมีความขรุขระ ไม่เรียบ มีรอยแตก มีรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งเกิดจากการระเหยของสารประกอบเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินที่ระเหยง่ายและการสลายตัวของวัสดุจากการไพโรไลซิส สำหรับ (ค) ถ่านชีวภาพชั่งข้าวโพดที่ตัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (CCB-KOH 4M) ผันของรูพรุนมีความบางลง พื้นผิวมีความพรุน

มากขึ้น มีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากที่กระจายตัวสม่ำเสมอ ซึ่งเป็นข้อสมบัติที่ดีของตัวดูดซับ (ง) ถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ดัดแปรด้วยกรดฟอสฟอริก (CCB-H₃PO₄ 2M) มีพื้นผิวขรุขระ มีรูพรุนขนาดใหญ่กระจายอยู่ทั่วไป มีผนังของรูพรุนหนากว่าถ่านชีวภาพ CCB-KOH 4M และรูพรุนบนพื้นผิวน้อยกว่าด้วยเช่นกัน ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์พื้นที่ผิวก่อนหน้านี้ที่พบว่า ถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (CCB-KOH 4M) มีพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนมากกว่าถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ดัดแปรด้วยกรดฟอสฟอริก (CCB-H₃PO₄ 2M) และถ่านชีวภาพซังข้าวโพด (CCB) ตามลำดับ

การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี และหมู่ฟังก์ชัน

การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี และหมู่ฟังก์ชันโดยใช้เทคนิค FTIR เป็นการใชพลังงานแสงช่วงแสงอินฟราเรดที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ พันธะเคมีที่อยู่ภายในโมเลกุลของตัวอย่างแต่ละชนิดจะดูดกลืนแสงที่ค่าความยาวคลื่นหนึ่ง และจะแสดงผลออกมาในรูปแบบของสเปกตรัม โดยสารแต่ละชนิดจะมีลักษณะของสเปกตรัมที่แตกต่างกัน ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน แสดงดังภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 สเปกตรัมของซังข้าวโพด และถ่านซังข้าวโพดดัดแปร ด้วยเทคนิค FTIR

จากภาพที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ FTIR ในการหาปริมาณฟังก์ชันของผิวของวัสดุของถ่านซังข้าวโพด และถ่านซังข้าวโพดดัดแปรด้วยสารเคมี ปรากฏพีกที่เลขคลื่น $3200-3600\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นเลขคลื่นที่แสดงการยืดตัวของกลุ่มไฮดรอกซิล (O-H) โดยกลุ่มเหล่านี้เป็นขี้ว และสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับกลุ่มคาร์บอกซิลของกรดไขมัน ซึ่งอาจบ่งบอกถึงความสามารถที่ดีในการดูดซับกรดไขมัน (Ayu et al., 2018) พีกที่เลขคลื่น $2800-3000\text{ cm}^{-1}$ พีกแสดงให้เห็นถึงการมีไฮโดรคาร์บอนอัลฟาติก (C-H) แม้จะไม่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการดูดซับกรดไขมัน แต่สามารถบ่งบอกถึงการมีโครงสร้างคาร์บอนซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับส่วนที่ไม่มีขี้วของกรดไขมันได้ (Hidayat, Adnan, & Diana, 2018) พีกที่เลขคลื่น $1400-1600\text{ cm}^{-1}$ เป็นพีกที่บ่งชี้ว่ามีการสั่นสะเทือนของกลุ่มไฮดรอกซิล (O-H) บนผิวหน้าของถ่านที่ดูดซับน้ำ ซึ่งมีส่วนช่วยในการดูดซับโดยการสร้างพันธะไฮโดรเจน (Mbah, J. B., et al., 2020) พีกที่เลขคลื่น 1700 cm^{-1} จะบ่งบอกถึงกลุ่มคาร์บอนิล กลุ่มเหล่านี้สามารถมีปฏิกิริยากับกรดไขมันได้ และมีการดูดซับที่ดี พีกที่เลขคลื่น $1000-1300\text{ cm}^{-1}$ สามารถบ่งบอกถึงพันธะอีเทอร์หรือเอสเทอร์ (C-O-C) ซึ่งออกซิเจนเหล่านี้สามารถช่วยดูดซับสารที่มีขี้ว (Hidayat, Adnan, & Diana, 2018)

ถ่านซังข้าวโพดที่ดัดแปรด้วย KOH และ H_3PO_4 พบว่ามีพีกที่เกี่ยวข้องกับกลุ่มไฮดรอกซิลและคาร์บอนิลเพิ่มขึ้นในช่วง $1700 - 1600\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งบ่งบอกถึงการดูดซับน้ำมันและการสร้างพันธะกับกรดไขมัน ส่งผลดีต่อการดูดซับกรดไขมันอิสระ เนื่องจากกลุ่มคาร์บอนิลสามารถจับกับกลุ่มคาร์บอกซิลของกรดไขมันอิสระได้ นอกจากนี้ยังพบว่าในช่วงพีก $3000-2800\text{ cm}^{-1}$ เกิดจากการยืดของพันธะ C-H ในกลุ่มอัลคาไนต์และอัลคีนมีการลดลงเล็กน้อยหลังการดัดแปรด้วย KOH และ H_3PO_4 ซึ่งแสดงถึงการลดลงของปริมาณกลุ่ม C-H ที่เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวของถ่าน ทำให้มีการดูดซับกรดไขมันอิสระได้ดียิ่งขึ้น (Liu, K., et al., 2016; Martínez-Mena, et al., 2016; Xu, G., et al., 2018)

จากการวิเคราะห์ภาพ FTIR ถ่านซังข้าวโพดที่ดัดแปรด้วย KOH และ H_3PO_4 เมื่อเทียบกับถ่านซังข้าวโพดที่ไม่ได้รับการดัดแปร การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้บ่งบอกถึงการเพิ่มหรือการเปลี่ยนแปลงของกลุ่มฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านซึ่งสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับสารเคมีที่มีขี้ว และมีแนวโน้มที่จะสามารถดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันได้ โดยเฉพาะกลุ่มไฮดรอกซิลที่สามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับกรดไขมัน การเพิ่มกลุ่มฟังก์ชันที่มีออกซิเจนอาจช่วยเพิ่มการดูดซับสารที่มีขี้วได้ดีขึ้น และการดัดแปรนี้ยังสามารถเพิ่มพื้นที่ผิวและรูพรุนทำให้วัสดุมีศักยภาพในการดูดซับที่ดีขึ้น

การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์มด้วยถ่านชีวภาพซังข้าวโพด

ในขั้นตอนการศึกษานี้ เป็นการศึกษาความสามารถในการดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์มด้วยถ่านชีวภาพซังข้าวโพด ถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ดัดแปรด้วย KOH และ H_3PO_4 ที่ได้จากการศึกษาสมบัติในข้างต้น และศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ โดยทำการทดสอบแบบไม่ต่อเนื่อง

(Batch test) การวิเคราะห์กรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์มด้วยเทคนิคการไทเทรชันเป็นการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระ และคุณภาพของน้ำมันด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยฟีนอล์ฟทาลีนเป็นอินดิเคเตอร์

ผลการศึกษาเวลาในการดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์ม และจลนพลศาสตร์

จากการศึกษาผลของเวลาในการดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์ม โดยทดสอบที่ความเข้มข้นของกรดไขมันอิสระร้อยละ 5 โดยมวล ปริมาณน้ำมัน 30 กรัม ปริมาณผงถ่านชีวภาพที่คัดแปร และไม่ได้คัดแปรปริมาณถ่าน 4 กรัม อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ด้วยระยะเวลา 30, 60, 120, 240, 300 และ 360 นาที ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.6-4.8 และภาพที่ 4.4 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.6 ผลการศึกษาเวลาในการดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์มด้วยถ่านชีวภาพซังข้าวโพด

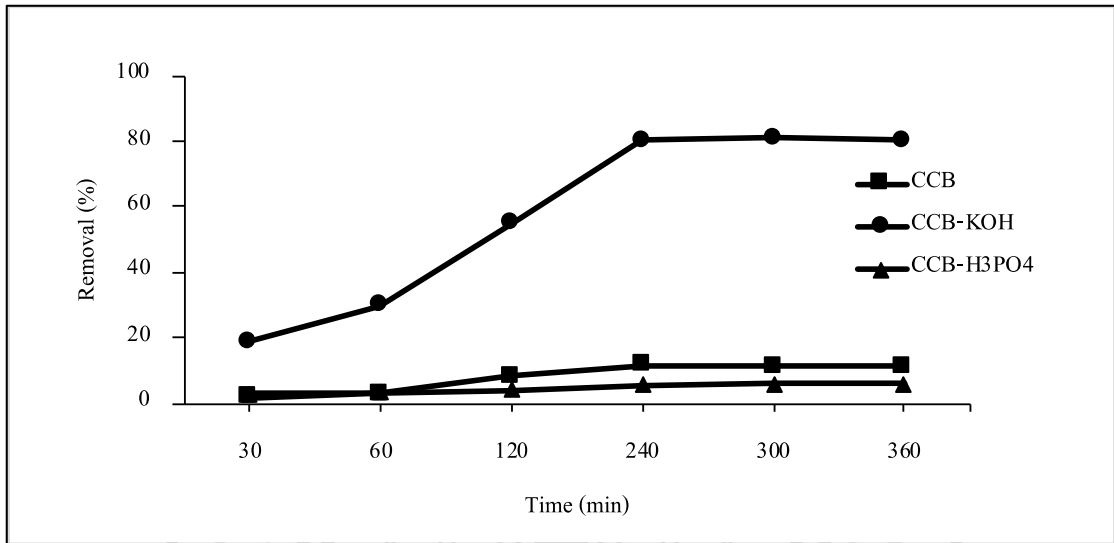
| เวลาดูดซับ (นาที) | ค่าความสามารถในการดูดซับ q_e (mg/g) | ความเข้มข้นของกรดไขมันอิสระในน้ำมันหลังการดูดซับ C_e (mg/L) | ประสิทธิภาพการดูดซับ (ร้อยละ) | กรดไขมันอิสระหลังการดูดซับ (FFA, %) |
|-------------------|---------------------------------------|---|-------------------------------|-------------------------------------|
| 30 | 6.40 | 42.55 | 1.80 | 4.65 |
| 60 | 10.75 | 42.02 | 3.03 | 4.59 |
| 120 | 29.54 | 39.59 | 8.34 | 4.33 |
| 240 | 39.40 | 36.58 | 11.62 | 4.00 |
| 300 | 38.40 | 36.70 | 11.32 | 4.01 |
| 360 | 38.40 | 36.70 | 11.32 | 4.01 |

ตารางที่ 4.7 ผลการศึกษาเวลาในการดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์มด้วยถ่านชีวภาพ
ซังข้าวโพดตัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

| เวลาดูดซับ (นาท) | ค่าความสามารถ ในการดูดซับ q_e (mg/g) | ความเข้มข้นของกรด ไขมันอิสระในน้ำมัน | ประสิทธิภาพการดูดซับ | กรดไขมันอิสระ หลังการดูดซับ |
|---------------------|--|---|----------------------|--------------------------------|
| | | หลังการดูดซับ C_e (mg/L) | (ร้อยละ) | (FFA, %) |
| 30 | 67.20 | 35.14 | 18.92 | 3.84 |
| 60 | 105.60 | 30.45 | 29.73 | 3.33 |
| 120 | 195.20 | 19.52 | 54.95 | 2.13 |
| 240 | 284.80 | 8.59 | 80.18 | 0.94 |
| 300 | 285.02 | 8.17 | 80.97 | 0.89 |
| 360 | 282.07 | 8.53 | 80.13 | 0.93 |

ตารางที่ 4.8 ผลการศึกษาเวลาในการดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์มด้วยถ่านชีวภาพ
ซังข้าวโพดตัดแปรด้วยกรดฟอสฟอริก

| เวลาดูดซับ (นาท) | ค่าความสามารถ ในการดูดซับ q_e (mg/g) | ความเข้มข้นของกรด ไขมันอิสระในน้ำมัน | ประสิทธิภาพการดูดซับ | กรดไขมันอิสระ หลังการดูดซับ |
|---------------------|--|---|----------------------|--------------------------------|
| | | หลังการดูดซับ C_e (mg/L) | (ร้อยละ) | (FFA, %) |
| 30 | 11.52 | 44.12 | 3.09 | 4.82 |
| 60 | 12.80 | 43.96 | 3.43 | 4.80 |
| 120 | 14.72 | 43.72 | 3.95 | 4.78 |
| 240 | 21.12 | 42.94 | 5.66 | 4.69 |
| 300 | 22.29 | 42.80 | 5.97 | 4.68 |
| 360 | 22.29 | 42.80 | 5.97 | 4.68 |



ภาพที่ 4.4 ผลของเวลาในการดูดซับกรดปาล์มมิดิกในน้ำมันปาล์มด้วยถ่านชีวภาพซังข้าวโพดคัดแปร และไม่ได้คัดแปร

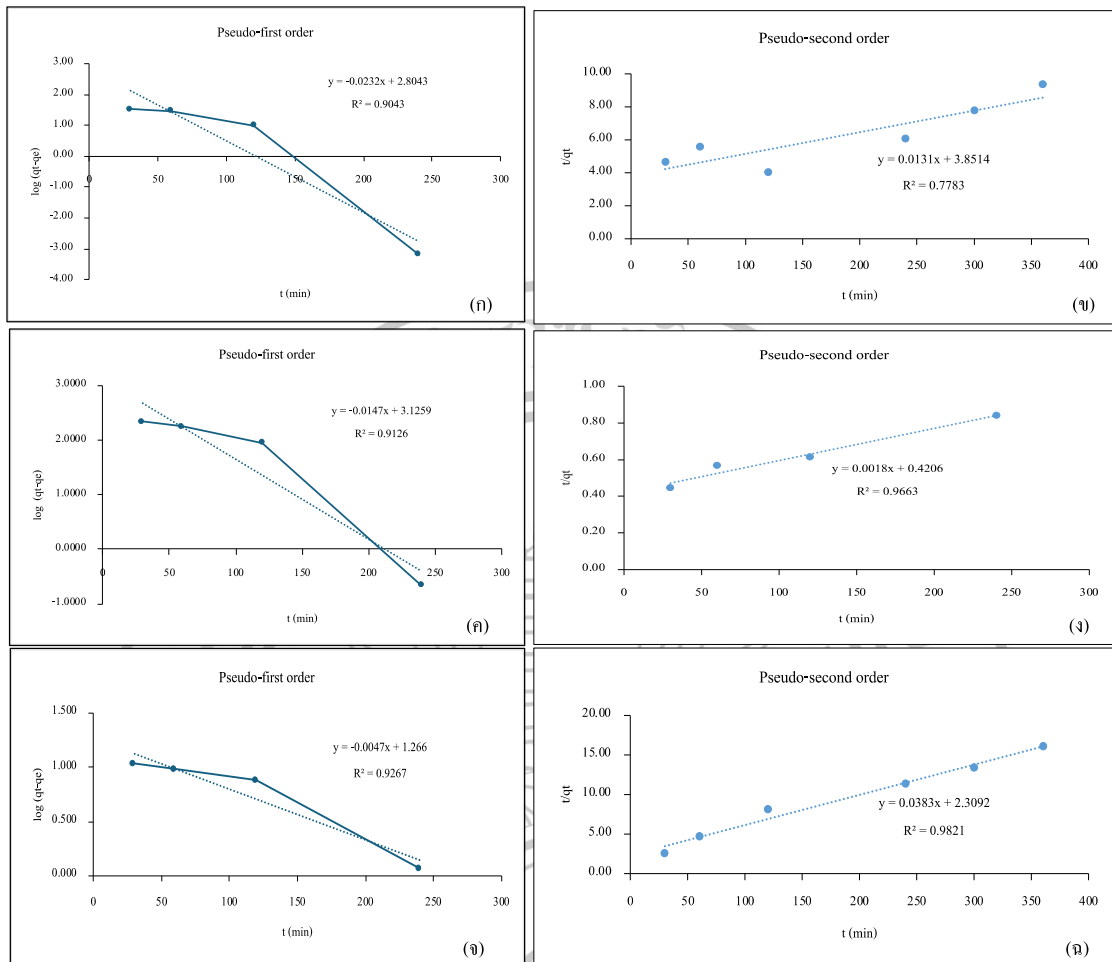
จากตารางที่ 4.6-4.8 และภาพที่ 4.4 ผลของเวลาในการดูดซับกรดปาล์มมิดิกในน้ำมันปาล์ม พบว่าปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มมีค่าลดลงตามเวลาที่ใช้ในการดูดซับเพิ่มขึ้น โดยมีการดูดซับกรดไขมันอิสระเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาของการดูดซับ 30 – 240 นาที อัตราการดูดซับที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วนั้นเกิดจากมีพื้นที่ผิวของตัวดูดซับจำนวนมาก และเมื่อเวลาในการดูดซับเพิ่มขึ้นอัตราในการดูดซับจะเริ่มลดลง และเข้าสู่สมดุลการดูดซับ การดูดซับที่ลดลงนั้นเกิดจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับลดลง ทำให้สามารถดูดซับกรดไขมันอิสระได้น้อย (Phetrungnapha, A. et al., 2023) หลังจากที่เข้าสู่ช่วงสมดุลการดูดซับแล้ว กรดไขมันอิสระจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือไม่ถูกดูดซับตามเวลาการดูดซับที่เปลี่ยนแปลง การดูดซับจะเกิดขึ้นสองเฟส กล่าวคือเฟสแรกจะมีการดูดซับอย่างรวดเร็วที่พื้นผิวของตัวดูดซับ และเมื่อระยะเวลาผ่านไปจะเกิดการดูดซับช้าลงเนื่องจากกรดไขมันอิสระมีการแพร่กระจายเข้าไปในถ่านดูดซับ ทำให้มีความสามารถในการดูดซับลดลง (Banerjee, et al., 2006) ซึ่งการศึกษานี้คล้ายคลึงกับงานวิจัยของ Chairgulprasert & Madlah (2018) ที่มีการศึกษาการดูดซับกรดไขมันอิสระด้วยถ่านจากแกลบคาเฟที่พบว่ามียอดการดูดซับสูงในช่วงแรก และลดลงเมื่อเข้าสู่ภาวะสมดุลที่ช่วงเวลา 210 - 240 นาที จากการศึกษาที่ช่วงเวลา 360 นาที

การศึกษากลไกการดูดซับเป็นการศึกษาอัตราเร็วปฏิกิริยาในการเข้าสู่สมดุลสำหรับการดูดซับกรดปาล์มมิดิกในน้ำมันปาล์ม ด้วยถ่านชีวภาพที่คัดแปร และไม่ได้คัดแปร เพื่อนำมาทำแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) และจลนพลศาสตร์อันดับสอง

เทียม (Pseudo-second order) ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.9 เมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยสมการ จลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม โดยการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\log(q_e - qt)$ กับเวลา ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ก) (ค) และ (จ) และสมการจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม โดยเขียนกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่าง t/q_t ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ข) (ง) และ (ฉ) และพิจารณาค่าสหสัมพันธ์ของ สมการถดถอยเชิงเส้น (R^2) จากผลการศึกษาพบว่า ถ่านชีวภาพที่ดัดแปร ด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (CCB-KOH) และถ่านชีวภาพที่ดัดแปรด้วยกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) มีค่า R^2 ของสมการจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียมเท่ากับ 0.9663 และ 0.9821 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเข้า ใกล้ 1 มากกว่าค่า R^2 จลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม ดังนั้นการดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมัน ปาล์มด้วย ถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ดัดแปร มีความสอดคล้องกับสมการจลนพลศาสตร์อันดับสอง เทียม (Pseudo-second order) ซึ่งเป็นการดูดซับที่เป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าและเป็นการดูด ซับทางเคมีที่มีผลมาจากตำแหน่งการเกิดปฏิกิริยา โดยมีค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง ในช่วง $7.7E-06$ และ 0.0018 min^{-1} ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบค่าความสามารถในการดูดซับพบว่า เมื่อใช้สมการจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียมคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับ มีค่าใกล้เคียง กับค่าความสามารถในการดูดซับที่ได้จากการทดลอง สำหรับถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ไม่ได้ดัด แปร (CCB) นั้นมีค่า R^2 ของสมการจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) ซึ่งเป็นผล มาจากแรงดึงดูดไฟฟ้าระหว่างผิวตัวดูดซับกับ โมเลกุลตัวถูกดูดซับ มีค่าเท่ากับ 0.9043 ซึ่งมีค่าเข้า ใกล้ 1 มากกว่า จลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม ซึ่งกรดไขมันอิสระถูกดูดซับด้วยพันธะที่ไม่ชอบน้ำ จากการดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และกรดฟอสฟอริกของถ่านชีวภาพซังข้าวโพด และ ยังมีพันธะไฮโดรเจนและปฏิกิริยาระหว่างไอออนกับไอออน ซึ่งสอดคล้องกับผลการ โครงสร้าง ทางเคมี และหมู่ฟังก์ชัน โดยใช้เทคนิค FTIR ก่อนหน้านี้ นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Rengga et al. (2021) ที่มีการศึกษาการใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการดัดแปรเปลือกกล้วย เพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชใช้แล้ว พบว่าการดัดแปรด้วยเปลือกกล้วย โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะมีพื้นผิวที่มีกลุ่มฟังก์ชันคาร์บอนหลายกลุ่มที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) และกลุ่มฟังก์ชันนอลออกซิเจน กรดไขมันอิสระจึงถูกดูดซับด้วยพันธะที่ไม่ชอบน้ำ และพันธะ ไฮโดรเจนระหว่างกระบวนการดูดซับ

ตารางที่ 4.9 พารามิเตอร์ของสมการจลนพลศาสตร์ของการดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์มด้วยถ่านดูดซับ

| ถ่านดูดซับ | $q_{e \text{ exp}}$ (mg/g) | จลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) | | | จลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม (Pseudo-second order) | | |
|------------------------------|-------------------------------|---|--------------------------------|--------|--|--------------------------------|--------|
| | | $q_{e \text{ cal}}$ | K_1 (min^{-1}) | R^2 | $q_{e \text{ cal}}$ | K_2 (min^{-1}) | R^2 |
| CCB | 39.4 | 2.804 | -0.053 | 0.9043 | 76.336 | 5827.166 | 0.7783 |
| CCB-KOH | 285.02 | 3.126 | -0.034 | 0.9126 | 555.55 | 7.7E-06 | 0.9663 |
| CCB- H_3PO_4 | 22.29 | 1.266 | -0.108 | 0.9267 | 26.110 | 0.0018 | 0.9821 |



ภาพที่ 4.5

จลนพลศาสตร์ของการดูดซับกรดปาล์มมิดิกในน้ำมันปาล์ม

- (ก) อันดับหนึ่งเทียมของถ่านชีวภาพซังข้าวโพด (CCB)
- (ข) อันดับสองเทียมของถ่านชีวภาพซังข้าวโพด (CCB)
- (ค) อันดับหนึ่งเทียมของถ่านชีวภาพซังข้าวโพดตัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (CCB-KOH)
- (ง) อันดับสองเทียมของถ่านชีวภาพซังข้าวโพดตัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (CCB-KOH)
- (จ) อันดับหนึ่งเทียมของถ่านชีวภาพซังข้าวโพดตัดแปรด้วยกรดฟอสฟอริก (CCB- H_3PO_4)
- (ฉ) อันดับสองเทียมของถ่านชีวภาพซังข้าวโพดตัดแปรด้วยกรดฟอสฟอริก (CCB- H_3PO_4)

ผลการศึกษาปริมาณถ่านชีวภาพในการดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์มและไอโซเทอร์ม

จากการศึกษาผลของปริมาณผงถ่านชีวภาพที่คัดแปร และไม่ได้คัดแปร ในการดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์ม โดยทดสอบที่ความเข้มข้นของกรดไขมันอิสระร้อยละ 5 โดยมวล ปริมาตรน้ำมัน 30 กรัม ระยะเวลาในการดูดซับ 240 นาที อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ปริมาณผงถ่าน 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.10-4.12 และภาพที่ 4.6

ตารางที่ 4.10 ผลของปริมาณถ่านชีวภาพซังข้าวโพดในการดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์ม

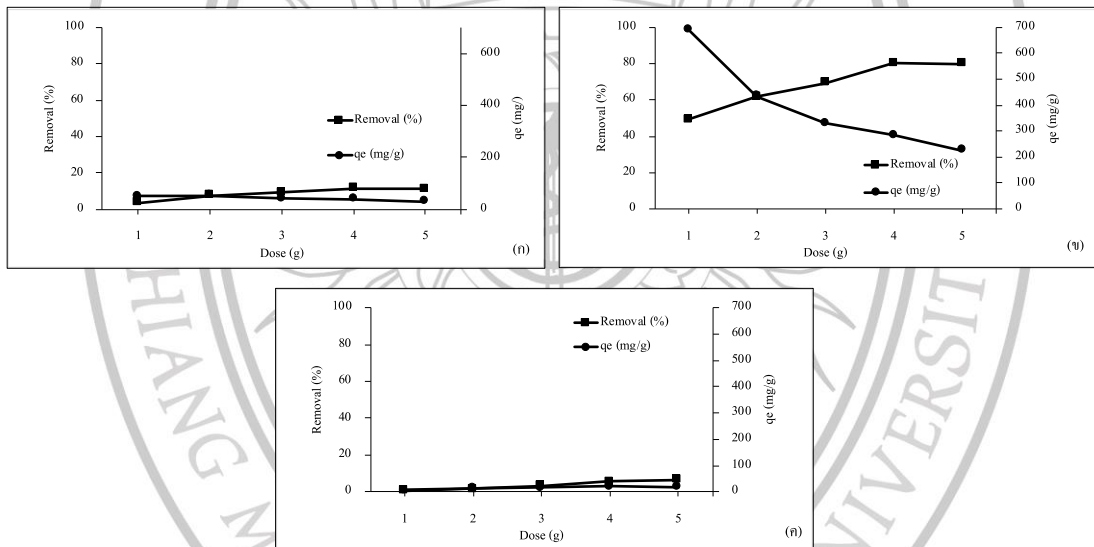
| ปริมาณผงถ่าน (กรัม) | ค่าความสามารถ ในการดูดซับ q_e (mg/g) | ความเข้มข้นของกรดไขมัน อิสระในน้ำมันหลังการดูดซับ C_e (mg/L) | ประสิทธิภาพ การดูดซับ (ร้อยละ) | กรดไขมัน อิสระหลัง การดูดซับ (FFA, %) |
|------------------------|--|--|--------------------------------------|--|
| 1 | 51.20 | 41.38 | 3.64 | 4.52 |
| 2 | 53.37 | 39.69 | 7.58 | 4.34 |
| 3 | 42.67 | 37.48 | 9.43 | 4.10 |
| 4 | 39.40 | 36.58 | 11.62 | 4.00 |
| 5 | 30.72 | 36.70 | 11.32 | 4.01 |

ตารางที่ 4.11 ผลของปริมาณถ่านชีวภาพซังข้าวโพดคัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในการดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์ม

| ปริมาณผงถ่าน (กรัม) | ค่าความสามารถ ในการดูดซับ q_e (mg/g) | ความเข้มข้นของกรดไขมัน อิสระในน้ำมันหลังการดูดซับ C_e (mg/L) | ประสิทธิภาพ การดูดซับ (ร้อยละ) | กรดไขมัน อิสระหลัง การดูดซับ (FFA, %) |
|------------------------|--|--|--------------------------------------|--|
| 1 | 691.20 | 21.86 | 49.09 | 2.39 |
| 2 | 435.20 | 16.40 | 61.82 | 1.79 |
| 3 | 329.02 | 13.23 | 69.47 | 1.45 |
| 4 | 284.80 | 8.59 | 80.18 | 0.94 |
| 5 | 225.28 | 8.59 | 80.00 | 0.94 |

ตารางที่ 4.12 ผลของปริมาณถ่านชีวภาพซังข้าวโพดดัดแปรด้วยกรดฟอสฟอริกในการดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์ม

| ปริมาณผงถ่าน (กรัม) | ค่าความสามารถ ในการดูดซับ q_e (mg/g) | ความเข้มข้นของกรดไขมัน อิสระในน้ำมันหลังการดูดซับ C_e (mg/L) | ประสิทธิภาพ การดูดซับ (ร้อยละ) | กรดไขมัน อิสระหลัง การดูดซับ (FFA, %) |
|------------------------|--|--|--------------------------------------|--|
| 1 | 7.68 | 45.44 | 0.51 | 4.97 |
| 2 | 12.80 | 44.90 | 1.71 | 4.91 |
| 3 | 17.07 | 43.72 | 3.45 | 4.78 |
| 4 | 21.12 | 42.94 | 5.66 | 4.69 |
| 5 | 19.46 | 42.55 | 6.52 | 4.65 |



ภาพที่ 4.6 ผลของปริมาณผงถ่านในการดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์ม
 (ก) ถ่านชีวภาพซังข้าวโพด (CCB)
 (ข) ถ่านชีวภาพซังข้าวโพดดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (CCB-KOH)
 (ค) ถ่านชีวภาพซังข้าวโพดดัดแปรด้วยกรดฟอสฟอริก (CCB-H₃PO₄)

จากตารางที่ 4.10-4.12 และภาพที่ 4.6 ผลของปริมาณถ่านในการดูดซับกรดปาล์มมิติก ในน้ำมันปาล์ม พบว่าปริมาณถ่านในการดูดซับ 1-4 กรัม จะมีประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และในทางกลับกันทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับของถ่านมีค่าลดลงด้วยเช่นกัน เนื่องจากการเพิ่มพื้นที่ผิวของถ่านดูดซับ และเมื่อเพิ่มปริมาณถ่านในการดูดซับเป็น 5 กรัม กลับทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับเท่าเดิม หรือลดลงเล็กน้อย อาจเนื่องมาจากปริมาณถ่านดูดซับที่มากเกินไปทำให้เกิดการจำกัดในการกระจายตัวของถ่านในระบบดูดซับ (Ismaila et al., 2017) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกปริมาณถ่านในการดูดซับ 4 กรัม ซึ่งถือได้ว่าเป็นปริมาณที่ทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับ และประสิทธิภาพการดูดซับมีค่าสูงสุดที่สุด

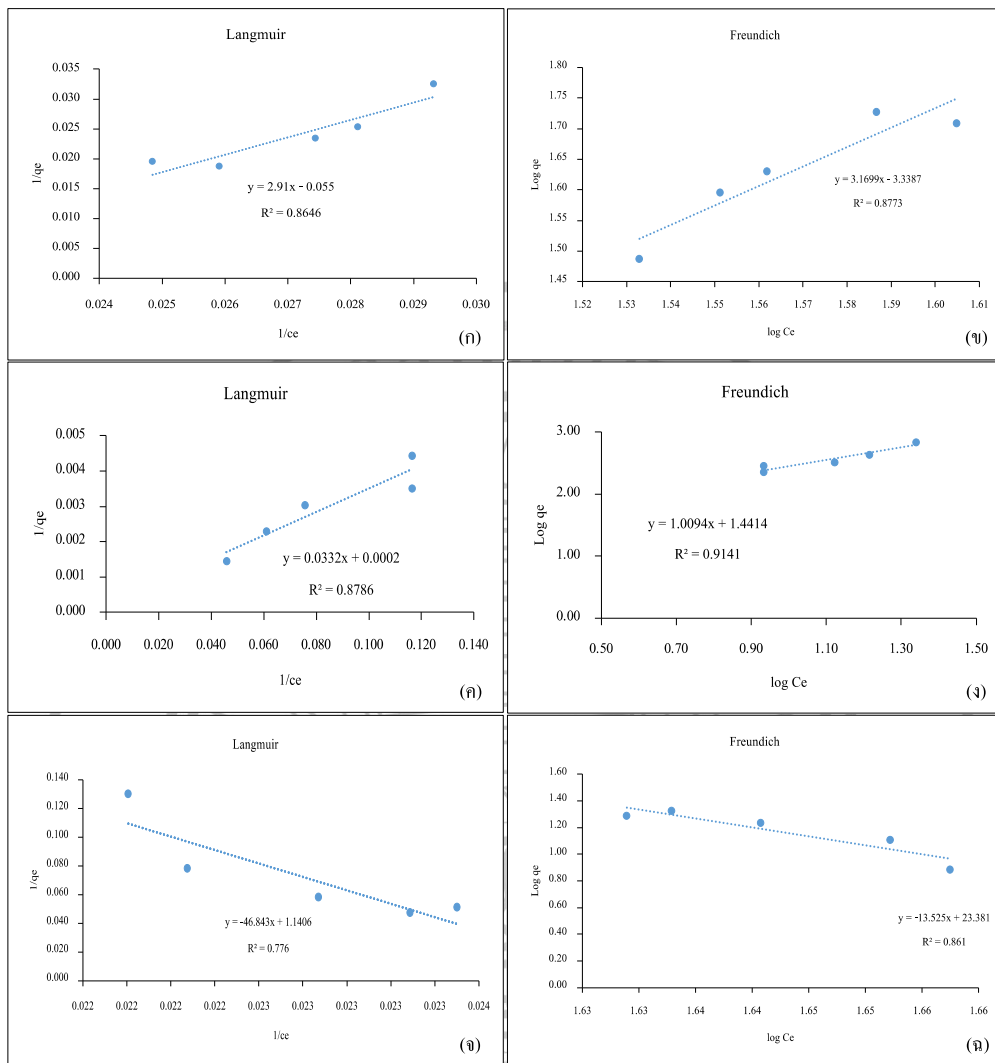
การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์ม เป็นการศึกษา ระหว่างปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อหน่วยของน้ำหนักของตัวดูดซับ และความเข้มข้นของสารที่อยู่ ณ จุดสมดุลสำหรับการดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์ม ด้วยถ่านชีวภาพที่ดัดแปร และไม่ดัดแปร เพื่อนำมาทำแบบจำลองไอโซเทอร์มแบบ Langmuir และ Freundlich ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.13 พบว่า ถ่านชีวภาพซังข้าวโพด (CCB) ถ่านชีวภาพที่ดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (CCB-KOH) ถ่านชีวภาพที่ดัดแปรด้วยกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) มีแนวโน้มการดูดซับไอโซเทอร์มแบบ Freundlich เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจความสัมพันธ์เชิงเส้น (R^2) เท่ากับ 0.877, 0.914 และ 0.861 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าค่า R^2 ของไอโซเทอร์มแบบ Langmuir ซึ่งถือได้ว่าถ่านทั้ง 3 แบบ มีการดูดซับแบบหลายชั้นที่เกิดการซ้อนทับกันของถ่านที่มีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Mbah, J. B., et al., 2020) โดยไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ Freundlich นั้น จะเป็นการดูดซับทางกายภาพที่เกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der waals) ซึ่งเป็นแรงที่ดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อนๆ จึงมีโมเลกุลของกรดไขมันอิสระเกาะอยู่บนผิวของถ่านดูดซับได้หลายชั้น (multilayer)

จากสมการ ไอโซเทอร์มแบบ Freundlich ซึ่งค่า K_f แสดงถึงความสามารถในการดูดซับของถ่านที่ใช้ในการดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์ม และ $1/n$ นั้นแสดงถึงความสามารถในการดูดซับหรือความแรงของการดูดซับกรดไขมันอิสระของความเป็นพื้นผิวหลายชั้น จากตารางผลการทดลองที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่า ถ่านชีวภาพซังข้าวโพด และถ่านชีวภาพที่ดัดแปรด้วยกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) มีความสามารถในการดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์ม หรือมีค่า K_f มากกว่าถ่านชีวภาพที่ดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (CCB-KOH) และเมื่อพิจารณาค่า n ซึ่งเป็นค่าคงที่แสดงถึงความแข็งแรงในการดูดซับ ถ่านชีวภาพที่ดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (CCB-KOH) มีค่าใกล้เคียง 1 ซึ่งเกิดการดูดซับที่มีการกระจายตัวของถ่านชีวภาพซังข้าวโพดในการดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์ม โดยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการดัดแปร จะช่วยทำให้เกิดการเพิ่มพื้นผิว และช่วยเพิ่มสมบัติโอเลโอไฟล์ิก (oleophilic properties)

ที่มีประสิทธิภาพในการจับกรดปาล์มมิติกและสารประกอบอื่นๆ ในน้ำมันได้ดียิ่งขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ji และคณะ (Z. Ji, et al., 2015) ที่มีการศึกษาพฤติกรรมดูดซับน้ำมันโดยใช้ซังข้าวโพดคั่วแปรด้วยกรดลอรริก และเอเทนไดออกไซด์ พบว่าการเติมสารเคมีดังกล่าวเป็นการเติมโซ่ หรือลักษณะการไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ให้แก่ตัวดูดซับ จึงทำให้วัสดุดูดซับเกิดความชอบน้ำมัน และมีการดูดซับน้ำมันที่ดีขึ้น

ตารางที่ 4.13 พารามิเตอร์ของไอโซเทอร์มการดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์มแบบ Langmuir และแบบ Freundlich ด้วยถ่านดูดซับ

| ถ่านดูดซับ | Langmuir | | | Freundlich | | | |
|----------------|-----------------|---------------|-------|-----------------|--------|-------|-------|
| | q_m (mg/g) | b (mg/g) | R^2 | K_f (mg/g) | $1/n$ | n | R^2 |
| CCB | 18.182 | 0.019 | 0.865 | 0.524 | 3.170 | 0.315 | 0.877 |
| CCB-KOH | 5000 | 0.006 | 0.879 | 0.159 | 1.009 | 0.991 | 0.914 |
| CCB- H_3PO_4 | 0.877 | 0.024 | 0.776 | 1.369 | 13.525 | 0.074 | 0.861 |



ภาพที่ 4.7

ไอโซเทอรั่มการดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์ม

(ก) แบบ Langmuir ของถ่านชีวภาพซังข้าวโพด (CCB)

(ข) แบบ Freundlich ของถ่านชีวภาพซังข้าวโพด (CCB)

(ค) แบบ Langmuir ของถ่านชีวภาพซังข้าวโพดตัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (CCB-KOH)

(ง) แบบ Freundlich ของถ่านชีวภาพซังข้าวโพดตัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (CCB-KOH)

(จ) แบบ Langmuir ของถ่านชีวภาพซังข้าวโพดตัดแปรด้วยกรดฟอสฟอริก (CCB- H_3PO_4)

(ฉ) แบบ Freundlich ของถ่านชีวภาพซังข้าวโพดตัดแปรด้วยกรดฟอสฟอริก (CCB- H_3PO_4)

ผลการศึกษาอุณหภูมิในการดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์ม และอุณหภูมิผลศาสตร์

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิในการดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์มด้วยถ่านชีวภาพที่ตัดแปรร และไม่ได้ตัดแปรร โดยทดสอบที่ความเข้มข้นของกรดไขมันอิสระร้อยละ 5 โดยมวล ปริมาณน้ำมัน 30 กรัม ระยะเวลาในการดูดซับ 240 นาที ปริมาณผงถ่าน 4 กรัม อุณหภูมิ 30, 45 และ 60 องศาเซลเซียส ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 ผลการศึกษาอุณหภูมิของการดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์มด้วยถ่านดูดซับ

| ถ่านดูดซับ | อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) | ค่าความสามารถในการดูดซับ q_c (mg/g) | ความเข้มข้นของกรดไขมันอิสระในน้ำมันหลังการดูดซับ C_c (mg/L) | ประสิทธิภาพการดูดซับ (ร้อยละ) | กรดไขมันอิสระหลังการดูดซับ (FFA, %) |
|------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------|---|-------------------------------|-------------------------------------|
| CCB | 30 | 12.80 | 39.82 | 3.77 | 4.35 |
| | 45 | 25.60 | 38.26 | 7.55 | 4.18 |
| | 60 | 39.40 | 36.58 | 11.62 | 4.00 |
| CCB-KOH | 30 | 118.40 | 28.89 | 33.33 | 3.16 |
| | 45 | 163.20 | 23.42 | 45.95 | 2.56 |
| | 60 | 284.80 | 8.59 | 80.18 | 0.94 |
| CCB-H ₃ PO ₄ | 30 | 8.32 | 44.51 | 2.23 | 4.86 |
| | 45 | 14.72 | 43.72 | 3.95 | 4.78 |
| | 60 | 21.12 | 42.94 | 5.66 | 4.69 |

จากตารางที่ 4.14 ผลการศึกษาอุณหภูมิในการดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์มพบว่าที่อุณหภูมิในการดูดซับ 30 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพการดูดซับต่ำกว่าการใช้อุณหภูมิ 45 และ 60 องศาเซลเซียส จากการใช้ถ่านดูดซับทุกชนิด และประสิทธิภาพของการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น จาก 30 ถึง 60 องศาเซลเซียส (303 ถึง 333 K) เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการดูดซับจะทำให้ความหนืดของน้ำมันที่ทำการดูดซับมีค่าลดลง และทำให้ถ่านดูดซับกระจายตัวได้ดียิ่งขึ้น จึงสามารถดูดซับกรดไขมันอิสระได้ดีกว่าที่อุณหภูมิต่ำ (Mbah, J. B., et, al., 2020)

การศึกษาอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์มเป็นการทำนายการเกิดขึ้นได้เองในกระบวนการดูดซับ โดยจะเกิดในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 60 องศาเซลเซียส (303 ถึง 333 K) ณ เงื่อนไขการทดลองดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมัน เมื่อนำผลการศึกษามาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log K_c$ และ $1/T$ สามารถคำนวณหาค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีและการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีจากค่าความชันและจุดตัดของสมการ อีกทั้งสามารถคำนวณการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ และค่าพารามิเตอร์ทางอุณหพลศาสตร์ ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.15 และภาพที่ 4.8 พบว่าการใช้ถ่านดูดซับทั้ง 3 แบบในการดูดซับกรดไขมันอิสระมีการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี (ΔH) เป็นลบ แสดงให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับเป็นการคายความร้อน (Exothermic Reaction) และเมื่ออุณหภูมิในการดูดซับเพิ่มขึ้นจะมีการคายความร้อนเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน เนื่องจากมีการแรงยึดเหนี่ยวระหว่างการดูดซับกรดไขมันอิสระกับถ่านชีวภาพที่แข็งแรงมากกว่าการใช้ถ่านในอุณหภูมิในการดูดซับที่ต่ำ (Ermi, G., et al., 2015) สำหรับการดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์มด้วยถ่านชีวภาพที่ไม่ได้ดัดแปร (CCB) นั้นมีค่าการคายความร้อนสูงกว่าการใช้ถ่านชีวภาพที่ดัดแปรด้วยด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (CCB-KOH) และถ่านชีวภาพที่ดัดแปรด้วยกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) แสดงถึงแรงยึดเหนี่ยวของถ่านชีวภาพที่ไม่ได้ดัดแปรนั้นมีความแข็งแรงกว่าถ่านชีวภาพซึ่งข้าวโพดที่ทำการดัดแปรด้วยสารเคมี ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ก่อนหน้านี้ที่เป็นการดูดซับแบบจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) ที่เกิดการดูดซับจากแรงดึงดูดไฟฟ้าระหว่างผิวของถ่านดูดซับกับโมเลกุลของกรดไขมันอิสระที่ถูกดูดซับ

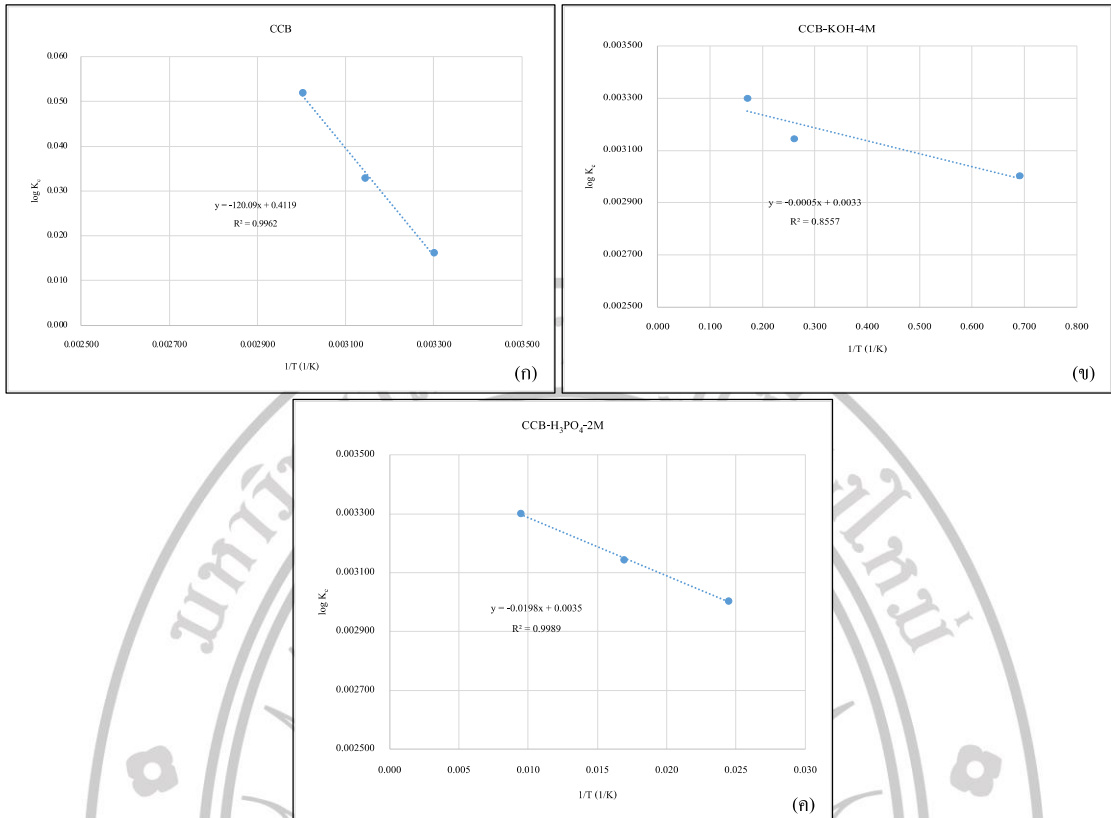
สำหรับการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (ΔS) ของการดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์มด้วยถ่านทั้ง 3 แบบ พบว่ามีค่าเป็นบวก ซึ่งบ่งบอกถึงมีการสุ่มเพิ่มขึ้นที่บริเวณรอยต่อระหว่างของเหลว และของแข็ง หรือการดูดซับเกิดขึ้นที่ระหว่างผิวหน้าของถ่านชีวภาพกับน้ำมันที่มีกรดไขมันอิสระ (Chairgulprasert & Madlah ; 2018, Phetrungnapha, A., 2023) ทำให้โมเลกุลของกรดไขมันอิสระที่อยู่ในระบบดูดซับมีความเป็นระเบียบเพิ่มขึ้นหลังเกิดการดูดซับ เนื่องจากโมเลกุลของกรดไขมันอิสระถูกตรึงไว้บนผิวถ่านของดูดซับ (ภราดร สุขจรรยา และคณะ, 2562; วัฒนวิศิษฐ์, นันทิกา และคณะ, 2563) จากตารางที่ 4.15 แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้อุณหภูมิในการดูดซับกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้นค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (ΔS) จะเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงถึงการยึดเกาะพื้นผิวที่สม่ำเสมอของโมเลกุลกรดไขมันอิสระบนผิวของถ่านตัวดูดซับเพิ่มขึ้นด้วย ส่วนการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ (ΔG) มีค่าเป็นลบ แสดงให้เห็นว่าการดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์มเป็นปฏิกิริยาที่สามารถเกิดขึ้นได้เองโดยธรรมชาติ อีกทั้งค่า ΔG ยังมีค่าเป็นลบเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งบ่งบอกถึงหากอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น

สอดคล้องกับงานวิจัยของ Phetrungnapha, A. (2023) ที่มีการศึกษาการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มใช้แล้วด้วยวัสดุดูดซับที่ดัดแปรด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยพบว่าเมื่ออุณหภูมิในการดูดซับเพิ่มขึ้น ค่าของ ΔG มีค่าเป็นลบเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงว่าเมื่ออุณหภูมิการดูดซับสูงขึ้นจะทำให้มีการดูดซับกรดไขมันอิสระได้ง่ายยิ่งขึ้น เนื่องจากความร้อนจะทำให้กรดไขมันอิสระที่อยู่ภายในน้ำมันสามารถยึดเกาะที่ผิวของตัวดูดซับได้ดียิ่งขึ้น



ตารางที่ 4.15 พารามิเตอร์ของสมการอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์มด้วยถ่านดูดซับ

| ถ่านดูดซับ | T (°C) | K _c | T (K) | R ² | Log K _c | 1/T (1/K) | ΔH ⁰ (kJ/mol) | ΔS ⁰ (J/mol.K) | ΔG ⁰ (kJ/mol) |
|-------------------------------------|-----------|----------------|----------|----------------|--------------------|--------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| CCB | 30 | 1.038 | 303 | 0.9962 | 0.016 | 0.003300 | -36.428 | 0.014 | -40.692 |
| | 45 | 1.079 | 318 | | 0.033 | 0.003145 | -38.276 | 0.154 | -87.177 |
| | 60 | 1.127 | 333 | | 0.052 | 0.003003 | -40.134 | 0.311 | -143.742 |
| CCB-KOH | 30 | 1.483 | 303 | 0.8557 | 0.171 | 0.003300 | -0.431 | 1.422 | -431.237 |
| | 45 | 1.821 | 318 | | 0.260 | 0.003145 | -0.689 | 2.163 | -688.441 |
| | 60 | 4.909 | 333 | | 0.691 | 0.003003 | -1.913 | 5.739 | -1913.079 |
| CCB- H ₃ PO ₄ | 30 | 1.022 | 303 | 0.9989 | 0.009 | 0.003300 | -0.030 | 0.079 | -23.849 |
| | 45 | 1.040 | 318 | | 0.017 | 0.003145 | -0.051 | 0.140 | -44.688 |
| | 60 | 1.058 | 333 | | 0.024 | 0.003003 | -0.074 | 0.203 | -67.765 |



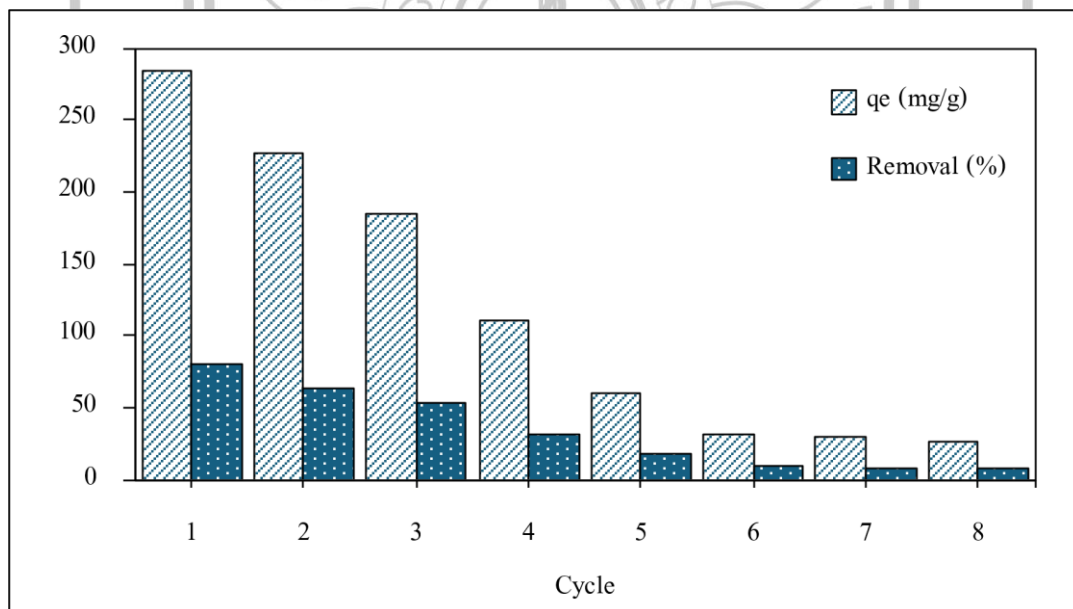
ภาพที่ 4.8 อุณหพลศาสตร์การดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์ม
(ก) ถ่านชีวภาพซังข้าวโพด (CCB), (ข) ถ่านชีวภาพซังข้าวโพดตัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (CCB-KOH), (ค) ถ่านชีวภาพซังข้าวโพดตัดแปรด้วยกรดฟอสฟอริก (CCB- H₃PO₄)

ผลการศึกษาจำนวนการใช้ถ่านชีวภาพดูดซับซังข้าว

จากการศึกษาจำนวนการใช้ถ่านชีวภาพดูดซับซังข้าวในการดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์ม โดยทดสอบที่ความเข้มข้นของกรดไขมันอิสระร้อยละ 5 โดยมีมวล ปริมาณน้ำมัน 30 กรัม ปริมาณผงถ่านชีวภาพที่ตัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (CCB-KOH) ปริมาณถ่าน 4 กรัม อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ด้วยระยะเวลา 240 นาที ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.16 และภาพที่ 4.8 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.16 จำนวนการใช้ถ่านชีวภาพซ้ำ หลังงานการดูดซับด้วยถ่านชีวภาพซังข้าวโพดตัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

| ครั้งที่ | ค่าความสามารถในการดูดซับ | ความเข้มข้นของกรดไขมันอิสระในน้ำมันหลังการดูดซับ | ประสิทธิภาพการดูดซับ | กรดไขมันอิสระหลังการดูดซับ |
|----------|--------------------------|--|----------------------|----------------------------|
| | q_e (mg/g) | C_e (mg/L) | (%) | (FFA, %) |
| 1 | 284.80 | 8.59 | 80.18 | 0.94 |
| 2 | 227.20 | 15.62 | 63.96 | 1.71 |
| 3 | 185.60 | 20.30 | 52.73 | 2.22 |
| 4 | 110.08 | 29.51 | 31.27 | 3.23 |
| 5 | 60.80 | 35.53 | 17.27 | 3.88 |
| 6 | 32.00 | 39.04 | 9.09 | 4.27 |
| 7 | 28.80 | 39.43 | 8.18 | 4.31 |
| 8 | 25.60 | 39.82 | 7.27 | 4.35 |



ภาพที่ 4.9 ประสิทธิภาพในการดูดซับกรดไขมันอิสระ และค่าความสามารถในการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มจากการใช้ถ่านซ้ำ

จากตารางที่ 4.16 และภาพที่ 4.9 ผลการใช้ถ่านซ้ําในการดูดซับกรดไขมันอิสระด้วยถ่านชีวภาพซ้ําซ้ําโพดที่ดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 4 โมลาร์ พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับ และค่าความสามารถจะลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อมีการใช้ถ่านดูดซับซ้ํา เนื่องจากถ่านดูดซับในครั้งแรกเข้าสู่ช่วงสมดุลของการดูดซับแล้ว และเมื่อนำถ่านมาใช้ซ้ําพื้นที่ผิวของถ่านที่สามารถดูดซับกรดไขมันอิสระจะลดลง ซึ่งเกิดจากรดไขมันอิสระในครั้งก่อนหน้านี้ติดเกาะอยู่ที่ผิวของตัวถ่านดูดซับ ทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง และประสิทธิภาพการดูดซับลดลงอย่างต่อเนื่อง (Phetrungnapha, A. et, al., 2023) ในการนำถ่านกลับมาใช้ซ้ําในงานวิจัยนี้ไม่ได้มีการล้าง หรือทำความสะอาด ทำให้การนำกลับไปใช้ซ้ําที่มีกรดไขมันอิสระติดอยู่ที่ผิวของถ่านดูดซับด้วย พบว่าการนำถ่านชีวภาพกลับมาใช้ดูดซับกรดไขมันอิสระซ้ําจะมีประสิทธิภาพและความสามารถในการดูดซับลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยจะสังเกตได้ชัดจากการใช้ซ้ําในครั้งที่ 6 พบว่ามีอัตราการดูดซับกรดไขมันอิสระไม่ได้ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากพื้นที่ผิวการดูดซับของถ่านอาจถูกตรึงด้วยกรดไขมันอิสระก่อนหน้านี้ ส่งผลให้ความสามารถดูดซับลดลง กรดไขมันอิสระที่เหลืออยู่หลังการดูดซับจึงมีค่าเพิ่มขึ้น จากการศึกษาในครั้งนี้ต้องการดูดซับกรดไขมันในน้ำมันปาล์ม โดยให้มีกรดไขมันอิสระมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 2 เพื่อนำน้ำมันที่จะได้มีค่าเหมาะสมแก่การเป็นน้ำมันสารตั้งต้นในการนำไปผลิตไบโอดีเซลต่อไป (ณัฐพล และคณะ, 2562; Ghosh, N., et al., 2024) จึงกล่าวได้ว่าถ่านชีวภาพที่ดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 4 โมลาร์ นำกลับมาใช้ซ้ําโดยไม่ได้มีการชะล้างทำความสะอาด สามารถใช้ซ้ําได้จำนวน 3 ครั้ง ยังคงทำให้มีประสิทธิภาพการดูดซับสูง และมีกรดไขมันอิสระลดลงเหลือประมาณร้อยละ 2.2

ผลการศึกษาตามสภาพจริง

ในขั้นตอนของการศึกษาตามสภาพจริงจะเป็นการศึกษาการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชใช้แล้ว ซึ่งเป็นน้ำมันที่ผ่านการใช้งานซ้ําที่ถูกรวบรวมจากร้านค้าบริเวณใกล้เคียง ปริมาณน้ำมัน 30 กรัม ปริมาณผงถ่านชีวภาพ (CCB) และถ่านชีวภาพที่ดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (CCB-KOH) 4 กรัม อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ด้วยระยะเวลา 240 นาที ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 ผลการเปรียบเทียบผลการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์ม

| ประเภทน้ำมัน | ถ่านดูดซับ | ค่าความสามารถในการดูดซับ | หลังการดูดซับ | | อ้างอิง |
|--------------|--------------------------|--------------------------|---------------|--------------|----------------------------------|
| | | | q_c (mg/g) | C_c (mg/L) | |
| น้ำมันปาล์ม | CCB | 19.46 | 41.77 | 20 | การศึกษาในครั้งนี้ |
| น้ำมันปาล์ม | CCB-KOH | 284.80 | 8.35 | 80.18 | การศึกษาในครั้งนี้ |
| น้ำมันปาล์ม | CCB | 21.12 | 9.23 | 5.66 | การศึกษาในครั้งนี้ |
| ไขมันใช้แล้ว | CCB-KOH | 58.50 | 6.94 | 50.32 | การศึกษาในครั้งนี้ |
| น้ำมันปาล์ม | ถ่านจากเปลือกมันสำปะหลัง | 322.58 | - | - | Phetrungnapha, A. et al., (2023) |

จากตารางที่ 4.17 ผลการศึกษาการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มที่ใช้ในการวิจัย และน้ำมันพืชใช้แล้วตามสภาพจริง พบว่าถ่านชีวภาพซังข้าวโพด (CCB) มีค่าความสามารถในการดูดซับ และประสิทธิภาพในการดูดซับน้อยมาก ทั้งในน้ำมันปาล์ม และน้ำมันใช้แล้ว ส่วนถ่านชีวภาพที่ตัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (CCB-KOH) มีประสิทธิภาพและค่าความสามารถในการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มสูงขึ้น แต่เมื่อนำมาทดสอบการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มใช้แล้วกลับมีค่าลดลง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากในน้ำมันปาล์มที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้เป็นน้ำมันปาล์มที่มีการเติมกรดไขมันประเภทกรดปาล์มมิดิกเพื่อให้มีกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้น ส่วนในน้ำมันพืชใช้แล้วจะผ่านการใช้งาน การทอดที่ใช้อุณหภูมิสูงอาจทำให้เกิดไกลเซอรอลซึ่งเกิดจากการสลายตัวของไตรกลีเซอไรด์ สารพอลาร์ที่เกิดจากกระบวนการออกซิเดชันและพอลิเมอไรเซชันของน้ำมัน สารอนุพันธ์ต่างๆ เช่น ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ แอลดีไฮด์ และคีโตน รวมถึงอาจมีสารปนเปื้อนอื่นๆ ในน้ำมันพืชใช้แล้ว (Mannu, A., et al., 2020) ที่ส่งผลต่อการดูดซับ สำหรับถ่านจากเปลือกมันสำปะหลังดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชใช้งานแล้ว จากงานวิจัยของ Phetrungnapha, A. et al., (2023) นั้นมีค่าความสามารถในการดูดซับใกล้เคียงกับการใช้ถ่านชีวภาพที่ตัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (CCB-KOH) แสดงให้เห็นว่าถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ตัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (CCB-KOH) ในงานวิจัยครั้งนี้สามารถใช้เป็นตัวดูดซับกรดไขมันอิสระที่มีประสิทธิภาพดีได้

บทที่ 5

สรุป และข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ทำการผลิตถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดด้วยกระบวนการอย่างง่าย เพื่อใช้สำหรับลดกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์ม โดยการนำซังข้าวโพดมาผ่านกระบวนการไพโรไลซิส และนำถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ได้ไปทำการดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) นำไปศึกษาดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์มที่มีความเข้มข้นของกรดไขมันร้อยละ 5 และยังมีการศึกษาเปรียบเทียบกับน้ำมันพืชที่ผ่านการใช้งานแล้ว สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การผลิตถ่านจากชีวภาพซังข้าวโพดจากการไพโรไลซิส และดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เพื่อใช้เป็นตัวดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มโดยมีการวิเคราะห์สมบัติทางเคมี และทางกายภาพ พบว่าจากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA การวิเคราะห์ห่อองค์ประกอบแบบประมาณ และการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ สามารถยืนยันได้ว่าซังข้าวโพดที่ได้รับความร้อนจากการเผาไหม้ทำให้เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินเกิดการสลายตัว และมีธาตุคาร์บอนเพิ่มขึ้น และเมื่อนำมาทำการดัดแปรด้วยสารเคมี จากผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR ของซังข้าวโพด และถ่านซังข้าวโพดสามารถยืนยันการมีอยู่ของกลุ่มฟังก์ชันกลุ่มฟอสเฟตที่เป็นความพรุนของถ่านที่ดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) มากกว่ากรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เนื่องจากมีความเข้มข้นของการดูดกลืนเพิ่มขึ้นสำหรับกลุ่มเอทิล และสำหรับกลุ่มอัลเคนมีค่าลดลง และมีแนวโน้มที่จะสามารถดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์มได้ และการดัดแปรนี้ยังสามารถเพิ่มพื้นที่ผิวและรูพรุนทำให้วัสดุมีศักยภาพในการดูดซับที่ดีขึ้น

2. การดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์ม ด้วยถ่านชีวภาพซังข้าวโพด (CCB) และถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (CCB-KOH) และกรดฟอสฟอริก (CCB-H₃PO₄) พบว่าถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ดัดแปรด้วย KOH นั้นมีประสิทธิภาพการดูดซับสูงกว่าถ่านแบบอื่นๆ ที่ทุกความเข้มข้น เนื่องจากลักษณะของถ่านมีความเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งยืนยันด้วยภาพ SEM และค่าไอโอดีนนัมเบอร์ และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้ในการดัดแปร ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน แต่เมื่อใช้ความเข้มข้นถึง 6 โมลาร์ ประสิทธิภาพการดูดซับมีค่ามากกว่าการใช้ความเข้มข้น 4 โมลาร์ เพียงเล็กน้อย อาจมีสาเหตุมาจากค่าความเข้มข้นของสารเคมีที่มากจนเกินไปจะไปทำพื้นผิวของตัวถ่านเกิดความเสียหาย ไม่เป็นรูพรุน จึงทำให้มีค่าความสามารถในการดูดซับลดลงด้วยเช่นกัน และเมื่อนำถ่านกลับมาใช้ซ้ำ สามารถใช้ซ้ำได้ถึง 3 ครั้ง ที่ยังคงทำให้มีประสิทธิภาพการดูดซับสูงถึงร้อยละ 52.73 มีกรดไขมันอิสระลดลงเหลือประมาณร้อยละ 2.2 ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขของน้ำมันสารตั้งต้นของการผลิตไบโอดีเซล ทั้งนี้ได้มีการทดสอบเปรียบเทียบกับดูดซับในน้ำมันพืชที่ผ่านการใช้งานแล้ว พบว่าถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ดัดแปรด้วย KOH นั้นมีประสิทธิภาพการดูดซับสูงถึงร้อยละ 50.32 ส่วนถ่านซังข้าวโพด (CCB) มีประสิทธิภาพการดูดซับสูงถึงร้อยละ 20

3. เวลาในการสัมผัส และจลนพลศาสตร์ของการดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์มด้วยถ่านชีวภาพทั้ง 3 แบบ มีประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น และเข้าสู่จุดสมดุลการดูดซับที่เวลา 240 นาที ถ่านชีวภาพที่ดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (CCB-KOH) และถ่านชีวภาพที่ดัดแปรด้วยกรดฟอสฟอริก (H₃PO₄) ความสอดคล้องกับสมการจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม มีค่าสหสัมพันธ์ของสมการถดถอยเชิงเส้น (R²) 0.9663 และ 0.9821 ตามลำดับ ซึ่งเป็นการดูดซับที่เป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าและเป็นการดูดซับทางเคมี ส่วนถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ไม่ได้ดัดแปร (CCB) มีค่าสหสัมพันธ์ของสมการถดถอยเชิงเส้น (R²) ของสมการจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียมเท่ากับ 0.9043 เป็นผลมาจากแรงดึงดูดไฟฟ้าระหว่างผิวตัวดูดซับกับโมเลกุลตัวถูกดูดซับ

4. ปริมาณของถ่านชีวภาพในการดูดซับกรดไขมันอิสระ ของถ่านชีวภาพทั้ง 3 แบบ มีประสิทธิภาพการดูดซับกรดไขมันอิสระสูงสุดจากการใช้ปริมาณถ่าน 4 กรัม ผลการการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์ม ถ่านชีวภาพซังข้าวโพด (CCB) ถ่านชีวภาพที่ดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (CCB-KOH) ถ่านชีวภาพที่ดัดแปรด้วยกรดฟอสฟอริก (H₃PO₄) มีค่า R² ในไอโซเทอร์มแบบ Freundlich เท่ากับ 0.887, 0.914 และ 0.861 ตามลำดับ เป็นการดูดซับที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน สามารถเกิดการดูดซับได้หลายชั้น

5. อุณหภูมิในการดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์ม การเพิ่มอุณหภูมิการดูดซับ จาก 30 ถึง 60 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพของการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงความหนืดของน้ำมันจะลดลง ทำให้ถ่านดูดซับจะกระจายตัวได้ดียิ่งขึ้น การศึกษาอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์มเป็นการทำนายการเกิดขึ้นได้เองในกระบวนการดูดซับ ในช่วงอุณหภูมิ 30 – 65 องศาเซลเซียส (298 – 318 เคลวิน) การใช้ถ่านดูดซับทั้ง 3 แบบในการดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์มมีค่าของ ΔG เป็นลบ การดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์มนี้จึงเป็นปฏิกิริยาที่สามารถเกิดขึ้นได้เองโดยธรรมชาติ และยังมีค่า ΔG ลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าการดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์มจะเกิดได้ง่ายยิ่งขึ้นหากอุณหภูมิสูงขึ้น ส่วนผลของ ΔH ยังมีค่าเป็นลบ ซึ่งบอกถึงการดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์มด้วยถ่านชีวภาพทั้ง 3 แบบ นั้นเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน หากอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ΔS มีค่าเป็นบวก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่บริเวณรอยต่อระหว่างของเหลว และของแข็งในระหว่างการดูดซับกรดไขมันอิสระกับถ่านชีวภาพมีการลู่เพิ่มขึ้น และ โมเลกุลของกรดไขมันอิสระมีความเป็นระเบียบเพิ่มขึ้น

6. การดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์มที่ใช้ในการวิจัย และน้ำมันพืชใช้แล้วตามสภาพจริง ด้วยถ่านชีวภาพซังข้าวโพด (CCB) และถ่านชีวภาพที่ดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (CCB-KOH) การดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มใช้แล้วกลับมีประสิทธิภาพการดูดซับน้อยกว่าการดูดซับในน้ำมันปาล์มที่ใช้ในการวิจัย เนื่องจากน้ำมันที่ผ่านการใช้งานแล้วมักผ่านความร้อนด้วยอุณหภูมิสูงหลายครั้งจะมีการสลายตัวของไตรกลีเซอไรด์ สารพอลาร์ที่เกิดจากกระบวนการออกซิเดชันและพอลิเมอร์เซชันของน้ำมัน สารอนุพันธ์ต่างๆ เกิดขึ้น อีกทั้งอาจมีการปนเปื้อนสารอื่น ๆ

ผลงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นได้ว่าถ่านชีวภาพที่ดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) สามารถนำมาเป็นตัวดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชได้ และยังสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้อีก ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้สำหรับเป็นวัสดุดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันก่อนการผลิตไบโอดีเซลได้

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการตรวจสอบ หรือวิเคราะห์สมบัติของถ่านชีวภาพด้วยวิธีอื่นเพิ่มเติม เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการนำมาใช้งานสำหรับการดูดซับกรดไขมันอิสระ
2. ควรมีการตรวจสอบ วิเคราะห์องค์ประกอบภายในน้ำมันเพิ่มเติม เพื่อการดูดซับที่เกิดขึ้น ถ่านชีวภาพที่นำไปดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันพืชอาจมีการดูดซับสารประเภทอื่น ๆ ด้วย
3. ในขั้นตอนการศึกษาการใช้ตัวดูดซับซ้ำ ควรมีการล้าง หรือทำความสะอาดถ่าน ก่อนนำมาดูดซับซ้ำ เพื่อชะล้างสารที่เกาะติดอยู่บนพื้นผิวของถ่าน แต่ต้องคำนึงถึงสารและวิธีการนั้นต้องไม่รบกวน หรือส่งผลต่อโครงสร้างของถ่านเพิ่มขึ้น หรือลดลง
4. ควรมีการวิเคราะห์ค่าสปอนิฟิเคชันในน้ำมัน เนื่องจากในการดูดซับกรดปาล์มมิติกในน้ำมันปาล์มอาจมีสบู่ซึ่งเป็นเกลือของกรดไขมันเกิดขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับของถ่านมีค่าลดลงเมื่อใช้เวลาการดูดซับเกินสมดุลของการดูดซับ



บรรณานุกรม

- กระทรวงอุตสาหกรรม. (2547). มาตรฐานสินค้าอุตสาหกรรม สำหรับยางธรรมชาติ บริสุทธิ์ (มอก. 900 — 2547). สืบค้นจาก http://www.fio.co.th/web/tisi_fio/fulltext/TIS900-2547.pdf
- กมลวรรณ สุขสวัสดิ์. (2559). ผลของวิธีสกัดไขมันต่อสมบัติทางเคมีและกายภาพของไขมัน และแป้งจากเมล็ดเงาะ. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, ปทุมธานี.
- กรมพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2554). โครงการวิจัย สาธิต และพัฒนาการใช้ไบโอดีเซลชุมชนเพื่อลดต้นทุนการผลิต. แหล่งที่มา <http://webkc.dede.go.th/testmax/sites/default/files/Binder1finaldefault/files/Binder1final.pdf> (7 มกราคม 2565)
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2558). แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558–2579. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน: กระทรวงพลังงาน, กรุงเทพฯ.
- กาญจนา ลากยงศ. (2543). การปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันทอดใช้แล้วด้วยซีอีถ้ากลบและถ่านกัมมันต์. (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.
- กำพล ประทีปชัยกูร, กฤษ สมนึก และนฤมล อินทร์รัตน์. (2557). การลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบชนิดที่บวมด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบหมุน. (รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์) มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา
- กุลธวัช เทพจันทร์. (2558). แบบจำลองทางสถิติ และการประเมินต้นทุนกระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชันปาล์มน้ำมันที่มีกรดไขมันอิสระสูงร้อยละ 3-90. (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- กุลธิดา สะอาด. (2557). ประสิทธิภาพการดูดซับผิวไอออนของแฉงของถ่านชีวภาพในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ. (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต) สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- คีต สร้อยทอง, ฉัตรเฉลิม แก้วชมภู, รังสินันท์ ณ รังษี และจารุวัตร เจริญสุข. (2562). ศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงไม้ยางพาราและไม้ไผ่ทอรีไฟด์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 33. จังหวัดอุดรธานี

- จักรพงษ์ ไชยบุรี และสรพงษ์ แสงสุวรรณ. (2556). การผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา KF/CaO ในตัวทำละลายร่วม. วารสารวิทยาศาสตร์ มข., 41(1), 176-182.
- จักรพล โพธิประสิทธิ์. (2547). การแยกสลายกากตะกอนที่ได้จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกทีเวเต็ด สลักซ์ด้วยความร้อน. (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.
- จุฬา สีนไพบูลย์. (2564). การจัดการวัสดุเหลือทิ้งเป็นศูนย์และลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตไฟฟ้าโดยใช้เชื้อเพลิงอัดแท่งจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์. (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต) มหาวิทยาลัยแม่โจ้, เชียงใหม่.
- ชนิดา มฤคทัต. (2550). การแปรสภาพกากสบู่ดำโดยกระบวนการไพโรไลซิสแบบชั้นเบดนิ่ง. (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- ชื่นสุมน อิ่มถิ่น, สาโรจน์ อิ่มถิ่น, เกียรติศักดิ์ ศรีวิจิตรกมล, อรุณี ชัยศรี, และวิษณุ แผงเมือง. (2559). การผลิตและตรวจสอบคุณภาพของน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันที่ใช้แล้วโดยใช้วัสดุเหลือทิ้ง. (รายงานวิจัย) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ, กรุงเทพฯ.
- ณัฐพล เจริญสุข, ภราดร สุขจรรยา, ชีรพงศ์ เจริญกิจ และ วรรณญา ทองนพคุณ. (2562). การศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาค่างที่เตรียมจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรสำหรับการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบที่มีกรดไขมันอิสระสูง. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 21(3), 102-111. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/KKUSciJ>
- ณิชชา นูรณสิงห์. (2562). ซังข้าวโพด : เชื้อเพลิงอัดแท่งเพื่อสิ่งแวดล้อม. เอกสารวิชาการอิเล็กทรอนิกส์. สำนักวิชาการ สำนักงานเลขาธิการสภาผู้แทนราษฎร.
- คุณฎิพร สิทธิกุล. (2557). คุณสมบัติของชีวมวลในกระบวนการทอรีแฟคชัน. (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต) มหาวิทยาลัยศิลปกร, นครปฐม.
- นคร ทิพยาวงศ์. 2553. เทคโนโลยีการเปลี่ยนสภาพชีวมวล. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ ส.ส.ท. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- เบญจพร เครือทะนันทไชย. (2557). การวิเคราะห์พารามิเตอร์และต้นทุนการผลิตถ่านชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า. (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.
- ปวีรศา เกตุยงเกียรติ. (2563). การเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟแบบสีฟ้าในน้ำโดยใช้วัสดุดูดซับโลหะออกไซด์ขนาดนาโนที่ปรับสภาพโดยใช้พอลิอะนิลีน. (วิทยานิพนธ์

- ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- ประภัสสร รัตนไพบูลย์. (2562). การพัฒนาถ่านชีวภาพโดยใช้ไฟโรไลซิสแบบช้า สำหรับประยุกต์ใช้งานด้านเกษตรกรรม. (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต) มหาวิทยาลัยแม่โจ้, เชียงใหม่.
- พัชรินทร์ โสระสิงห์. (2562). การใช้ประโยชน์จากของเสียสับปะรดเพื่อนำไปเป็นวัสดุดูดซับราคาถูกสำหรับกำจัดสี. (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.
- ภราดร สุขจรยา, และคณะ. (2562). การใช้ถ่านชีวภาพซึ่งข้าวโพดสำหรับการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันทอด. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 21(3), 112-121.
- ภัทรดิกรรณ์ รักษ์ศักดิ์ศรี. (2555). การผลิตและตรวจสอบคุณภาพของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระแตกต่างกัน. (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- ภาคภูมิ จตุรพรสวัสดิ์, วีระวัฒน์ กลอวุฒิมันตร์, ชวงส์ ชัยสุข และพรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์. (2554). การเตรียมตัวดูดซับจากแกลบเพื่อดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบ. การประชุมวิชาการนานาชาติวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทยครั้งที่ 21. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ภาณุ พร้อมพุทธางกูร, น้อมจิตต์ แก้วไทย อันเดร และธำปณี ศรีชุมพวง. (2558). การใช้ซังข้าวโพดเป็น PVD เพื่อเร่งการทรุดตัวของชั้นดินเหนียวอ่อน. (รายงานวิจัย) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย, สงขลา.
- ลลิตา แสงอาทิตย์. (2554). การดูดซับยาปฏิชีวนะ *Norfloxacin* โดยถ่านแกลบที่ pH 5-8. (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต) มหาวิทยาลัยศิลปากร, นครปฐม.
- วรรณิศา กลิ่นจันทร์. (2558). การวิเคราะห์หาปริมาณสารเมทแอมเฟตามีนในยาเสพติดด้วยเทคนิค *Thin Layer Chromatography* และ โพรแกรมวิเคราะห์ภาพ. (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต) มหาวิทยาลัยศิลปากร, นครปฐม.
- วัฒนวิศิษฐ์ นันทิภา, และคณะ. (2563). การใช้ถ่านชีวภาพจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรสำหรับการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชใช้แล้ว. วารสารวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม, 12(1), 1-12. <https://tci-thailand.org/list%20journal.php>
- วิมลมาศ ศิริวาณิชย์. (2558). การดูดซับกรดโอเลอิกโดยใช้ตัวดูดซับที่ได้จากกากอ้อย. (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.

- วิไลวรรณ แผงสุภา. (2557). การทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกมังคุด. (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- วุฒิชัย รสชาติ. (2560). การวิเคราะห์น้ำมันไบโอดีเซลชนิดกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโคปี. *SNRU Journal of Science and Technology*, 9(1), 397- 406.
- ไววุฒิ ภูทอง, สายฝน สิ้นสมุทรไทย, นัยนา พรหมอุดม, ปัญญารัตน์ สิงห์พยัคฆ์, ภัทรมาศ มากมูล, กิติพัทธ์ โพธิ์ศรี, ศุภกร คางาม และจรัสใจ เพชรแก้ว. (2557). เอกสารองค์ความรู้เรื่อง ถ่านชีวภาพ. เพชรบุรี: ศูนย์ศึกษาการพัฒนาห้วยทรายอันเนื่องมาจากพระราชดำริ.
- ศรัณย์ธรรม ภูริจารุยางกูร. (2559). การวิเคราะห์ดินโดยวิธี FTIR และการวัดสีดิน. (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต) มหาวิทยาลัยศิลปากร, นครปฐม.
- ศศิگانต์ ปานปรานีเจริญ, เสาวภา ชุมณี, วิไลพร ปองเพ็ชร, รุจิรา คุ่มทรัพย์, และนันทกฤษ รอดเกต. (2561). การศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์*, 3(1), 1-12.
- ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต. (ม.ป.ป.). ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (adsorption isotherm). Retrieved from เครื่องวิเคราะห์คุณลักษณะพื้นที่ผิว (Surface Area Analyzer) website <https://sites.google.com/site/csicscitu/instrument/kheruxngwikheraahkhunlaksnaphunthiphiwsurfaceareaanalyzer/adsorption-isotherm>
- สโรชา เฟิงศรี. (2555). การกำจัดกลีเซอรินออกจากไบโอดีเซลที่เตรียมจากน้ำมันประกอบอาหารที่ใช้แล้ว โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยเป็นตัวดูดซับ. (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรศาสตรมหาบัณฑิต) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- สายฝน เกียวสัมพันธ์. (2563). การตรวจสอบความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ในไบโอดีเซลด้วยทินเลเซอร์โครมาโทกราฟี. *วารสารวิชาการด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 3(1), 93-101.
- สุภาวดี ผลประเสริฐ. 2557, การปรับสภาพวัตถุดิบพอลิกลินเชลลูโลสสำหรับการผลิตเอทานอล, *ว.วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี* 22: 641649.
- สำนักงานจังหวัดเชียงใหม่. (2563). *บรรยายสรุปจังหวัดเชียงใหม่*. กลุ่มงานยุทธศาสตร์และข้อมูลเพื่อการพัฒนาจังหวัด. สำนักงานจังหวัดเชียงใหม่.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2563). *ข่าวโศกเลื่องสัตว์รายอำเภอปี 2563*. เข้าถึง

<https://www.oae.go.th/view/.pdf>.

- เสาวภา ไวยสุศรี. (2558). *กำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียโดยการดูดซับด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่*. (รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์) มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต, กรุงเทพฯ.
- อดิศักดิ์ คีรีรักษ์. (2561). *การศึกษาตัวดูดซับราคาถูกจากเส้นใยธรรมชาติเหลือทิ้งเพื่อกำจัดสีคริสตัลไวโอเล็ต*. (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต) มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา.
- อนุวัฒน์ ยอดอรัญญ. (2552). *การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระสูง*. (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.
- อรุณี ศุภสินสาธิต. ม.ป.ป. *พลังงานจากชีวมวลที่มีเซลลูโลสสูง*. วารสารสิ่งแวดล้อม, 16(2), 36-43.
- อัญรินทร์ พิธาภักดีสถิตย์. (2559). *การดูดซับธาตุอาหารจากน้ำคลองด้วยซีโอไลต์ร่วมกับถ่านกัมมันต์: กรณีศึกษาลองชวดหมื่น จังหวัดสมุทรปราการ*. (วิทยานิพนธ์ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต) มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, ปทุมธานี.
- อุศราวดี ชื่นทิม. (2558). *การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ถ่านชีวภาพที่ได้จากกระบวนการแยกสลายซังข้าวโพดด้วยความร้อน*. (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.
- Abed, K.A., Morsi, A.K.E., Sayed, M.M., Shaib, A.A.E. and Gad, M.S. (2018). Effect of Waste Cooking-oil Biodiesel on Performance and Exhaust Emissions of a Diesel Engine. *Egyptian Journal of Petroleum*, 27, 985–989.
- Abdullah M, Aslam, & Ayush Choudhary. (2017). Removal of Oil from Seawater Using Charcoal and Rice Hull. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 263(3).
- Ali, Rehab F. M., and A. M. El Anany. (2014). Recovery of Used Frying Sunflower Oil with Sugar Cane Industry Waste and Hot Water. *Journal of Food Science and Technology* 51(11):3002–13.
- Alsherbeny, Sherif, Tarek S. Jamil, Sanaa A. M. El-Sawi, and Fawzy I. Eissa. (2022). Low-Cost Corn Cob Biochar for Pesticides Removal from Water. *Egyptian Journal of Chemistry* 65(2):639–50.
- Ayu Putranti, Monika Larasati Tres, Sang Kompiang Wirawan, & I. Made Bendiyasa. (2018). Adsorption of Free Fatty Acid (FFA) in Low-Grade Cooking Oil Used Activated Natural

- Zeolite as Adsorbent. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 299(1):0–8.
- Banerjee, S. S., Joshi, M. V., & Jayaram, R. V. (2006). Treatment of oil spill by sorption technique using fatty acid grafted sawdust. *Chemosphere*, 64(6), 1026-1031.
- Bayrak, Yuksel. 2006. "Application of Langmuir Isotherm to Saturated Fatty Acid Adsorption." *Microporous and Mesoporous Materials* 87(3):203–6.
- Berchmans, Hanny Johanes, and Shizuko Hirata. (2008). Biodiesel Production from Crude *Jatropha Curcas* L. Seed Oil with a High Content of Free Fatty Acids. *Bioresource Technology* 99(6):1716–21.
- Bhat, S. V., Nagasampagi, B. A. & Meenakshi, S. (2009). Natural products chemistry and applications. Oxford: *Alpha Science International*.
- Biswas, Bijoy, Nidhi Pandey, Yashasvi Bisht, Rawel Singh, Jitendra Kumar, & Thallada Bhaskar. (2017). Pyrolysis of Agricultural Biomass Residues: Comparative Study of Corn Cob, Wheat Straw, Rice Straw and Rice Husk. *Bioresource Technology* 237:57–63.
- Cantrell, Keri B., Patrick G. Hunt, Minoru Uchimiya, Jeffrey M. Novak, & Kyoung S. Ro. (2012). Impact of Pyrolysis Temperature and Manure Source on Physicochemical Characteristics of Biochar. *Bioresource Technology* 107:419–28.
- Changwatchai, T., Nakajima, M., Felipe, L. O., & Neves, M. A. (2022). Separation of free fatty acid and triglycerides by molecular distillation—Experimental and simulation approaches. *Processes*, 10(10), 2053. <https://doi.org/10.3390/pr10102053>
- Chairgulprasert, Vanida, & Porntip Madlah. (2018). Removal of Free Fatty Acid from Used Palm Oil by Coffee Husk Ash." *Science and Technology Asia* 23(3):1–9.
- Chen, Dengyu, Xiaojuan Chen, Jun Sun, Zhongcheng Zheng, & Kexin Fu. (2016). Pyrolysis Polygeneration of Pine Nut Shell: Quality of Pyrolysis Products and Study on the Preparation of Activated Carbon from Biochar. *Bioresource Technology* 216:629–36.
- Chueasupcharoen Wanwanut. (2018). *Development of composite polyelectrolyte complex membrane for cationic dye and heavy metal sorption*. (Master of Engineering Thesis), Chulalongkorn University, Bangkok.
- Cole, Emily J., Omid R. Zandvakili, Baoshan Xing, Masoud Hashemi, Stephen Herbert, & Hamid H. Mashayekhi. (2019). Dataset on the Effect of Hardwood Biochar on Soil Gravimetric

Moisture Content and Nitrate Dynamics at Different Soil Depths with FTIR Analysis of Fresh and Aged Biochar. *Data in Brief* 25:104073.

Deb, Anjan, Jannatul Ferdous, Kaniz Ferdous, M. Rakib Uddin, Maksudur R. Khan, and Md Wasikur Rahman. (2017). Prospect of Castor Oil Biodiesel in Bangladesh: Process Development and Optimization Study. *International Journal of Green Energy* 14(12):1063–72.

Díaz, L. & Brito A. (2016). FFA Adsorption from Waste Oils or Non-Edible Oils onto an Anion-Exchange Resin as Alternative Method to Esterification Reaction Prior to Transesterification

Drané, M.; Zbair, M.; Hajjar-Garreau, S.; Josien, L.; Michelin, L.; Bennici, S.; Limousy, L. Unveiling the Potential of Corn Cob Biochar: Analysis of Microstructure and Composition with Emphasis on Interaction with NO₂. *Materials* 2024, 17, 159. <https://doi.org/10.3390/ma17010159> Reaction for Biodiesel Production. *Journal of Advanced Chemical Engineering* 4(2):2–7.

Dimian, Alexandre C., C. S. Bildea, F. Omota, and A. A. Kiss. (2009). Innovative Process for Fatty Acid Esters by Dual Reactive Distillation. *Computers and Chemical Engineering* 33(3):743–50.

Dong, Haoran, Junmin Deng, Yankai Xie, Cong Zhang, Zhao Jiang, Yujun Cheng, Kunjie Hou, and Guangming Zeng. (2017). Stabilization of Nanoscale Zero-Valent Iron (NZVI) with Modified Biochar for Cr(VI) Removal from Aqueous Solution. Vol. 332. *Elsevier B.V.*

Downie, A., Crosky, A. & Munroe, P. (2009). Physical Properties of Biochar, in Lehmann, J. and Joseph, S. (editors), *Biochar for Environmental Management*, Earthscan, London: 13-32.

Engelhard, M. H., T. C. Droubay, and Y. Du. (2016). X-Ray Photoelectron Spectroscopy Applications. *Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry*: 716–24.

Ermí, G., Agung, A. K., Refi, I., Hermansyah, A., Zulkarnain, C., & Rahmiana, Z. (2015). The purification of waste cooking oil based on lipid profiles measurements by using skin of *Salacca zalacca*. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 7(9S), 59-65.

Fahmi, Alaa Hasan, Abd Wahid Samsuri, Hamdan Jol, and Daljit Singh. (2018). Physical Modification of Biochar to Expose the Inner Pores and Their Functional Groups to Enhance Lead Adsorption. *RSC Advances* 8(67):38270–80.

- Fong, Yuk, Moi., Rozidaini, Mohd, Ghazi., Mohd, Zazmiezi, Mohd, Alias. (2020). Removal of Emulsified Oil in Wastewater by Corn Cob Carbon. doi: 10.1088/1755-1315/549/1/012065
- Firestone, D. 2004. Official methods and recommended practices of the American Oil Chemists' Society, AOCS Press. IL: Campaign
- Fitri, R. A., A. Wirakusuma, A. Fahrina, M. Roil Bilad, & N. Arahman. (2019). Adsorption Performance of Low-Cost Java Plum Leaves and Guava Fruits as Natural Adsorbents for Removal of Free Fatty Acids from Coconut Oil. *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics* 32(10):1372–78.
- Fu, Dun, Zheng Chen, Dong Xia, Liang Shen, Yuanpeng Wang, and Qingbiao Li. (2017). A Novel Solid Digestate-Derived Biochar-Cu NP Composite Activating H₂O₂ System for Simultaneous Adsorption and Degradation of Tetracycline. *Environmental Pollution* 221:301–10.
- Fuseini, Mohammed, Ahmed H. El-Shazly, and Marwa Elkady. (2020). Effects of Doping on Zeta Potential and Ph of Polyaniline Colloidal Suspension. *Materials Science Forum* 1008 MSF:114–20.
- Ghorbel-Abid, I., C. Vagner, R. Denoyel, and M. Trabelsi-Ayadi. (2016). Effect of Cadmium and Chromium Adsorption on the Zeta Potential of Clays. *Desalination and Water Treatment* 57(36):17128–38.
- Ghosh, N., Patra, M., & Halder, G. (2024). Current advances and future outlook of heterogeneous catalytic transesterification towards biodiesel production from waste cooking oil. *Sustainable Energy & Fuels*, 8(4), 1105-1152. <https://doi.org/10.1039/D3SE01564E>
- Gotore, O., Itayama, T., Dang, B.-T., Nguyen, T.-D., Ramaraj, R., Osamu, N., Shuji, T., & Maseda, H. (2022). Adsorption analysis of ciprofloxacin and delafloxacin onto the corn cob derived-biochar under different pyrolysis conditions. *Biomass Conversion and Biorefinery*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-03156-y>
- Guo, Dan, Guoxin Xie, & Jianbin Luo. (2014). Mechanical Properties of Nanoparticles: Basics and Applications. *Journal of Physics D: Applied Physics* 47(1).
- Gwenzi, Willis, Nhamo Chaukura, Terrence Wenga, & Munyaradzi Mtisi. (2021). Biochars as Media for Air Pollution Control Systems: Contaminant Removal, Applications and Future

Research Directions. *Science of the Total Environment* 753:142249.

- Hamza, Usman D., Noor S. Nasri, Nor Aishah S. Amin, Jibril Mohammed, and Husna M. Zain. (2016). Characteristics of Oil Palm Shell Biochar and Activated Carbon Prepared at Different Carbonization Times. *Desalination and Water Treatment* 57(17):7999–8006.
- Hendriks, A.T. & Zeeman, G. (2009) Pretreatments to Enhance the Digestibility of Lignocellulosic Biomass. *Bioresource Technology*, 100, 10-18.
- Hidayat, Arif, Muflih A. Adnan, and Diana. (2018). Free Fatty Acid Removal on Sludge of Palm Oil Using Heterogeneous Solid Catalyst Derived from Palm Empty Fruit Bunch. *International Journal of Renewable Energy Research* 8(2):986–93.
- Hoda, N. (2010). Optimization of Biodiesel Production from Cottonseed Oil by Transesterification Using NaOH and Methanol. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects* 32(5):434–41.
- Hong, Mengfan, Limei Zhang, Zhongxin Tan, and Qiaoyun Huang. (2019). Effect Mechanism of Biochar's Zeta Potential on Farmland Soil's Cadmium Immobilization. *Environmental Science and Pollution Research* 26(19):19738–48.
- Huang, Yanqin, Zhiguo Wei, Zejing Qiu, Xiuli Yin, & Chuangzhi Wu. (2012). Study on Structure and Pyrolysis Behavior of Lignin Derived from Corn cob Acid Hydrolysis Residue. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 93:153–59.
- Huggins, Tyler M., Alexander Haeger, Justin C. Biffinger, and Zhiyong Jason Ren. (2016). Granular Biochar Compared with Activated Carbon for Wastewater Treatment and Resource Recovery. *Water Research* 94:225–32.
- Ismaila, Ammaru, Nur Nazlina Saimon, Mazura Jusoh, & Zaki Yamani Zakaria. (2017). Adsorption of Free Fatty Acid in Biodiesel from Palm Fatty Acid Distillate Using Koh-Activated Starch. *Chemical Engineering Transactions* 56:619–24.
- Jahirul, M. I., Rasul, M. G., Chowdhury, A. A., & Ashwath, N. (2012). Biofuels production through Biomass Pyrolysis - A Technological Review. *Energies*. 5 (12), 4958.
- Ji, Z., Lin, H., Chen, Y.-f., Dong, Y.-b., & Imran, M. (2015). Corn cob modified by lauric acid and ethanediol for emulsified oil adsorption. *Journal of Central South University*, 22(9), 2096–2105. <https://doi.org/10.1007/s11771-015-2734-0>
- Khok, Yi Thung, Chee Heong Ooi, Akihiko Matsumoto, & Fei Yee Yeoh. (2020). Reactivation of

- Spent Activated Carbon for Glycerine Purification. *Adsorption* 26(7):1015–25.
- Khuzaimah, Siti, & Norma Eralita. (2020). Utilization of Adsorbent Carbon Coconut Shell for Purification of Used Cooking Oil. *IJCA (Indonesian Journal of Chemical Analysis)* 3(2):88–95.
- Kim, Kwang Ho, Jae Young Kim, Tae Su Cho, & Joon Weon Choi. (2012). Influence of Pyrolysis Temperature on Physicochemical Properties of Biochar Obtained from the Fast Pyrolysis of Pitch Pine (*Pinus Rigida*). *Bioresource Technology* 118:158–62.
- Kołodziejowska, D., J. Krukowska, and P. Thomas. (2017). Comparison of Sorption and Desorption Studies of Heavy Metal Ions from Biochar and Commercial Active Carbon. *Chemical Engineering Journal* 307:353–63.
- Kulkarni, Mangesh G., & Ajay K. Dalai. (2006). Waste Cooking Oil - An Economical Source for Biodiesel: A Review. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 45(9):2901–13.
- Kumar, Adarsh, Komal Saini, & Thallada Bhaskar. (2020). Hydrochar and Biochar: Production, Physicochemical Properties and Techno-Economic Analysis. *Bioresource Technology* 310(April):123442.
- Kumar, Sandeep, Vijay A. Loganathan, Ram B. Gupta, & Mark O. Barnett. (2011). An Assessment of U(VI) Removal from Groundwater Using Biochar Produced from Hydrothermal Carbonization.” *Journal of Environmental Management* 92(10):2504–12.
- Kuo-Chao, Lo, Wu Keng-Tung, Chyang Chien-Song, & Ting Wei-The. (2009). A New Study on Combustion Behavior of Pine Sawdust Characterized by the Weibull Distribution. *Chinese Journal of Chemical Engineering* 17(5):860–68.
- Lawal, Abubakar Abdullahi, Mohd Ali Hassan, Mohd Rafein Zakaria, Mohd Zulkhairi Mohd Yusoff, Mohd Nor Faiz Norrrahim, Mohd Noriznan Mokhtar, & Yoshihito Shirai. (2021). Effect of Oil Palm Biomass Cellulosic Content on Nanopore Structure and Adsorption Capacity of Biochar. *Bioresource Technology* 332(January):125070.
- Lee, Jechan, Ki Hyun Kim, and Eilhann E. Kwon. (2017). Biochar as a Catalyst. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 77(August 2016):70–79.
- Li, Ronghua, Jim J. Wang, Baoyue Zhou, Mukesh Kumar Awasthi, Amjad Ali, Zengqiang Zhang, Lewis A. Gaston, Altaf Hussain Lahori, and Amanullah Mahar. (2016). Enhancing Phosphate Adsorption by Mg/Al Layered Double Hydroxide Functionalized Biochar with

Different Mg/Al Ratios. *Science of the Total Environment* 559:121–29.

- Li, Bing, Lan Yang, Chang quan Wang, Qing pei Zhang, Qing cheng Liu, Yi ding Li, and Rui Xiao. (2017). Adsorption of Cd(II) from Aqueous Solutions by Rape Straw Biochar Derived from Different Modification Processes. *Chemosphere* 175(Ii):332–40.
- Liu, K., Liu, C., Wang, Z., Li, H., & Chen, J. (2016). Preparation and characterization of activated carbon from corncob by H₃PO₄ activation for the removal of methylene blue. *Journal of Environmental Chemical Engineering*
- Li, Lin, Suqin Liu, and Junxin Liu. (2011). Surface Modification of Coconut Shell Based Activated Carbon for the Improvement of Hydrophobic VOC Removal. *Journal of Hazardous Materials* 192(2):683–90.
- Li, Xiang Guo, Bao Guo Ma, Li Xu, Zhen Wu Hu, & Xin Gang Wang. (2006). Thermogravimetric Analysis of the Co-Combustion of the Blends with High Ash Coal and Waste Tyres. *Thermochimica Acta* 441(1):79–83.
- Liu, Can, Wendong Wang, Rui Wu, Yun Liu, Xu Lin, Huan Kan, and Yunwu Zheng. (2020). Preparation of Acid- And Alkali-Modified Biochar for Removal of Methylene Blue Pigment. *ACS Omega* 5(48):30906–22.
- Liu, Xuan, Yang Zhang, Zifu Li, Rui Feng, & Yaozhong Zhang. (2014). Characterization of Corncob-Derived Biochar and Pyrolysis Kinetics in Comparison with Corn Stalk and Sawdust. *Bioresource Technology* 170:76–82.
- Mannu, A., Garroni, S., Ibanez Porras, J., & Mele, A. (2020). Available technologies and materials for waste cooking oil recycling. *Processes*, 8(3), 366. <https://doi.org/10.3390/pr8030366>
- Mapato, Chaowarit, Metha Wanapat, & Anusorn Cherdthong. (2010). Effects of Urea Treatment of Straw and Dietary Level of Vegetable Oil on Lactating Dairy Cows. *Tropical Animal Health and Production* 42(8):1635–42.
- Martínez-Mena, M., Juárez-Flores, R. A., Díaz-García, M. C., Rubio-Avalos, M., & López-Bucio, J. (2016). KOH-modified activated carbon from corncob for the removal of copper ions from water. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(18), 18263-18274. <https://irinagyurjinyan.wordpress.com/2022/04/12/%D1%83%D1%80%D0%BE%D0%B>

- Mbah, J. B., Kada, B., Daniele, E. M., Larissa, T. T., Antoine, E., & Richard, K. (2020). Adsorption mechanisms of pigments and free fatty acids in the discoloration of shea butter and palm oil by an acid-activated Cameroonian smectite. *Scientific African*, 9, e00498. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00498>
- Miyuranga, K. A. V., Arachchige, U. S. P. R. P., Marsø, T. M. M., & Samarakoon, G. (2023). Biodiesel production through the transesterification of waste cooking oil over typical heterogeneous base or acid catalysts. *Catalysts*, 13(3), 546. <https://doi.org/10.3390/catal13030546>
- Moradi, G.R., Mohadesi, M., Ghanbari, M., Moradi, M.J., Hosseini, Sh. And Davoodbeygi, Y. (2015). Kinetic Comparison of Two Basic Heterogenous Catalysts Obtained from Sustainable Resources for Transesterification of Waste Cooking Oil. *Biofuel Research Journal*, 6, 236-241.
- Munera-Echeverri, J. L., V. Martinsen, L. T. Strand, V. Zivanovic, G. Cornelissen, and J. Mulder. (2018). Cation Exchange Capacity of Biochar: An Urgent Method Modification. *Science of the Total Environment* 642:190–97. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.017.
- Narachai, Benjaluck, Kanlayanee Kajsanthia, Nattawut Osakoo, Jatuporn Wittayakun, & Sanchai Prayoonpokarach. (2018). Adsorption of Oleic Acid Using Mcm-41 Synthesized from Rice Husk Silica. *Suranaree Journal of Science and Technology* 25(1):37–48.
- Phetrungnapha, A., Wiengnak, N., & Maikrang, K. (2023). Removal of free fatty acid from waste cooking oil using an adsorbent derived from cassava peels. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 40(9), 2253-2262. <https://doi.org/10.1007/s11814-023-1413-3>
- Pruszko, Rudy. (2020). *Biodiesel Production*. Second Edition. Elsevier.
- Radhika, M., & K. Palanivelu. (2006). Adsorptive Removal of Chlorophenols from Aqueous Solution by Low Cost Adsorbent-Kinetics and Isotherm Analysis. *Journal of Hazardous Materials* 138(1):116–24.
- Rattanaphaiboon, P., Homdoug, N., & Tippayawong, N. (2022). Production and characterization of corncob biochar for agricultural use. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2681, No. 1, 020034). AIP Publishing. <https://doi.org/10.1063/5.0117160>
- Rahayu, Sri, Supriyatin, & Adiati Bintari. (2018). Activated Carbon-Based Bio-Adsorbent for Reducing Free Fatty Acid Number of Cooking Oil. *AIP Conference Proceedings*

2019(October 2018).

- Regmi, Pusker, Jose Luis Garcia Moscoso, Sandeep Kumar, Xiaoyan Cao, Jingdong Mao, and Gary Schafran. (2012). Removal of Copper and Cadmium from Aqueous Solution Using Switchgrass Biochar Produced via Hydrothermal Carbonization Process. *Journal of Environmental Management* 109:61–69.
- Rengga, W. D. P., A. Seubsai, S. Roddecha, A. Yudistira, & A. D. Wiharto. (2021). Isotherm Adsorption of Free Fatty Acid in Waste Cooking Oil Used Activated Carbon of Banana Peel as Bio-Adsorbent. *Journal of Physics: Conference Series* 1918(3).
- Ronsse, F., Hecke, S.V., Dickinson, D., and Prins, W. (2013). Production and characterization of slow pyrolysis biochar: influence of feedstock type and pyrolysis conditions. *Global Change Biology Bioenergy*. 5, 104-115.
- Sabo, Daniel. (2021). Free Fatty Acid Removal from Oil Using Magnetic Nanoparticles. *Proceedings of the Arkansas Nutrition Conference. Vol. 2021, Art. 4.*
- Sasujit, K., Sanpinit, W., Wongrin, N. & Dussadee, N. (2015). Study of Process Densification of Corn Cob and Corn Husk Briquettes by Cold Extrusion Technique Using Starch with Lime Mixed as Binder. *Thaksin University Journal*, 18(1), 5-14.
- Sizmur, Tom, Teresa Fresno, Gökçen Akgül, Harrison Frost, and Eduardo Moreno-Jiménez. (2017). Biochar Modification to Enhance Sorption of Inorganics from Water. *Bioresource Technology* 246:34–47.
- Sohi, S. P., E. Krull, E. Lopez-Capel, & R. Bol. (2010). A Review of Biochar and Its Use and Function in Soil. *Advances in Agronomy* 105(1):47–82.
- Somsesta, Noppon, Viboon Sricharoenchaikul, & Duangdao Aht-Ong. (2020). Adsorption Removal of Methylene Blue onto Activated Carbon/Cellulose Biocomposite Films: Equilibrium and Kinetic Studies. *Materials Chemistry and Physics* 240(September 2019):122221.
- Sulaiman, S., Shah, B., & Jamal, P. (2017). Production of biodiesel from palm oil using chemically treated fish bone catalyst. *Chemical Engineering Transactions*. 56, 1525-1530.
- Sych, N. V., S. I. Trofymenko, O. I. Poddubnaya, M. M. Tsyba, V. I. Sapsay, D. O. Klymchuk, & A. M. Puziy. (2012). Porous Structure and Surface Chemistry of Phosphoric Acid Activated Carbon from Corncob. *Applied Surface Science* 261:75–82.

- Tsutsui, Nozomi, Genzoh Tanabe, Ayako Kita, Reiko Sugiura, & Osamu Muraoka. (2013). The First Total Synthesis of Acremomannolipin A, the Potential Ca²⁺ Signal Modulator with a Characteristic Glycolipid Structure, Isolated from the Filamentous Fungus *Acremonium Strictum*. *Tetrahedron Letters* 54(6):451–53.
- T., A., Adekanye., Oluwasogo, A., Dada., Kolapo, Jegede., Makun, Aderinto. (2022). Pyrolysis of maize cob at different temperatures for biochar production: Proximate, ultimate and spectroscopic characterization. *Research in Agricultural Engineering*, doi: 10.17221/106/2020-rae
- Wang, Jianlong, and Shizong Wang. (2019). Preparation, Modification and Environmental Application of Biochar: A Review. *Journal of Cleaner Production* 227:1002–22.
- Wang, Meng, Jim J. Wang, and Xudong Wang. (2018). Effect of KOH-Enhanced Biochar on Increasing Soil Plant-Available Silicon. *Geoderma* 321(July 2017):22–31.
- Wang, Shurong, Gongxin Dai, Haiping Yang, & Zhongyang Luo. (2017). Lignocellulosic Biomass Pyrolysis Mechanism: A State-of-the-Art Review. *Progress in Energy and Combustion Science* 62:33–86.
- Waraho, Thaddao, D. Julian McClements, & Eric A. Decker. (2011). Impact of Free Fatty Acid Concentration and Structure on Lipid Oxidation in Oil-in-Water Emulsions. *Food Chemistry* 129(3):854–59.
- Weber, Kathrin, & Peter Quicker. (2018). Properties of Biochar. *Fuel* 217 (December 2017):240–61.
- Wu, Hongwei, Qiyang Feng, Hong Yang, Easar Alam, Bo Gao, and Deming Gu. (2017). Modified Biochar Supported Ag/Fe Nanoparticles Used for Removal of Cephalexin in Solution: Characterization, Kinetics and Mechanisms. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 517:63–71
- Xiaoxue, He., Xue-wan, Chen., Xinran, Wang., Li, Jiang. (2023). Optimization of activated carbon production from corn cob using response surface methodology. *Frontiers in Environmental Science*, doi: 10.3389/fenvs.2023.1105408
- Xu, G., Zhang, J., Sun, R., Wang, D., & Hu, M. (2018). Preparation and characterization of activated carbon from corncob by KOH activation for adsorption of methylene blue. *BioResources*, 13(2), 3708-3722. <https://irinagyurjinyan.wordpress.com/D1%80%>

D0%BE%D0%BA-19/

- Yang, Xue, Shiqiu Zhang, Meiting Ju, and Le Liu. (2019). Preparation and Modification of Biochar Materials and Their Application in Soil Remediation. *Applied Sciences (Switzerland)* 9(7).
- Yin, Zhihong, Yunguo Liu, Shaobo Liu, Luhua Jiang, Xiaofei Tan, Guangming Zeng, Meifang Li, Sijia Liu, Sirong Tian, and Ying Fang. (2018). Activated Magnetic Biochar by One-Step Synthesis: Enhanced Adsorption and Coadsorption for 17β -Estradiol and Copper. *Science of the Total Environment* 639:1530–42.
- Youssef, H.L.H., Fetni, S., Boubahri, C., Said, R. and Lassoued, I. (2019). An Experimental Study of Optimization of Biodiesel Synthesis from Waste Cooking Oil and Effect of the Combustion Duration on Engine Performance. *International Journal of Renewable Energy Research*, 9 (1), 1-9.
- Zhang, Q., Wang, Y., Xue, Z., Li, J., Liu, L., Zhang, W., & Zhou, J. (2021). Study on Adsorption Properties of Modified Corn Cob Activated Carbon for Mercury Ion. *Energies*, 14(15), 4483.
- Zhu, Xianqian, Aiqian Ye, Timothee Verrier, and Harjinder Singh. (2013). Free Fatty Acid Profiles of Emulsified Lipids during in Vitro Digestion with Pancreatic Lipase. *Food Chemistry* 139(1–4):398–404.
- Zhao, Ling, Wei Zheng, Ondřej Mašek, Xiang Chen, Bowen Gu, Brajendra K. Sharma, and Xinde Cao. (2017). Roles of Phosphoric Acid in Biochar Formation: Synchronously Improving Carbon Retention and Sorption Capacity. *Journal of Environmental Quality* 46(2):393–401.
- Zuo, Xiao Jun, Zhengang Liu, and Min Dong Chen. (2016). Effect of H_2O_2 Concentrations on Copper Removal Using the Modified Hydrothermal Biochar.” *Bioresource Technology* 207:262–67.



ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์ค่าไอโอดีนนมเบอร์

การดูดซับไอโอดีน ตามมาตรฐาน AWWA B 604

วิธีเตรียมสารละลาย

- 1) สารละลายกรดไฮโดรคลอริก เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก
ผสมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (HCl) จำนวน 70 มิลลิลิตร 550 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันลงในน้ำกลั่น
- 2) สารละลายมาตรฐาน โปแตสเซียมไอโอเดต 0.100 N (นอร์มัล, N)
ชั่ง โปแตสเซียมไอโอเดต (Primary Standard Grade Potassium Iodate, KIO_3) ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นใน โถดูดความชื้นจำนวน 3.5667 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้เป็น 1,000 มิลลิลิตร
- 3) สารละลายมาตรฐาน โซเดียมไทโอซัลเฟต 0.1 ± 0.001 N (นอร์มัล, N)
ละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (Sodium Thiosulfate, $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$) 24.8200 กรัม ในน้ำกลั่นที่ผ่านการต้มให้เดือด 75.00 มิลลิลิตร เติมโซเดียมคาร์บอเนต 0.1000 กรัม ถ้ายสารละลายลงในขวดปรับปริมาตร (Volumetric Flask) ขนาด 1 ลิตร ทำให้เจือจางด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร เก็บสารละลายไว้ในขวดสีชา ทิ้งไว้อย่างน้อย 4 วัน ก่อนทำการสอบความเข้มข้น
- 4) สารละลายมาตรฐาน ไอโอดีน 0.1 ± 0.001 N (นอร์มัล, N)
ชั่งไอโอดีน 12.7000 กรัม และโปแตสเซียมไอโอไดน์ (KI) 19.1000 กรัม ผสมให้เข้ากันและเติมน้ำกลั่น 2 – 5 มิลลิลิตร คนให้ของแข็งละลาย ค่อยๆ เติมน้ำทีละน้อย จนกระทั่งให้สารละลายประมาณ 40 มิลลิลิตร ทิ้งสารละลายไว้อย่างน้อย 4 ชั่วโมง คนเป็นระยะเพื่อให้แน่ใจว่าของแข็งละลายหมด ถ้ายสารละลายลงในขวดปรับปริมาตร (Volumetric Flask) ขนาด 1 ลิตร ทำการเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร เก็บสารละลายไว้ในขวดสีชา ตรวจสอบความเข้มข้น กับสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.1000 นอร์มัล
- 5) น้ำแป้งเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก
สารละลายแป้ง (soluble starch) 1.0 ± 0.5 กรัม ผสมน้ำกลั่น 5 – 10 มิลลิลิตร คนให้ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน เติมน้ำกลั่นเพิ่มอีก 25 ± 5 มิลลิลิตร เทสารละลายลงในน้ำเดือด 1 ลิตร แล้วต้มต่อให้เดือดอีก 5 นาที

การตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลาย

1) การตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไซโอซัลเฟต

- ปิเปตสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต (KIO_3) 25. มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมโพแทสเซียมไอโอไดน์ (KI) 2 ± 0.1 กรัม เขย่าให้ละลาย เติมกรดไฮโดรคลอริก เข้มข้น 5 mL ลงในขวดรูปชมพู่ เขย่าให้เข้ากัน

- ไทเทรตทันทีด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.1 นอร์ จนกระทั่งสารละลายจางลงเป็นสีเหลืองอ่อน (ใกล้ถึงจุด End Point) หยคน้ำแป้ง 2 – 3 หยด สารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน ไทเทรตต่อสารละลายไม่มีสี บันทึกปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้

คำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต

สมการ

$$N_1 = \frac{(P \times R)}{S}$$

เมื่อ N_1 คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (นอร์มัล)
 P คือ ปริมาตรของสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต (มิลลิลิตร)
 R คือ ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต (นอร์มัล)
 S คือ ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรต (มิลลิลิตร)

2) การตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน

- ปิเปตสารละลายไอโอดีน 25 มิลลิลิตร ในขวดรูปชมพู่ 250 มิลลิลิตร

- ไทเทรตทันทีด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.1000 นอร์มัล เมื่อสีของสารละลายไอโอดีนจางลงจนกระทั่งเป็นสีเหลืองอ่อน (ใกล้ถึงจุด End Point) หยคน้ำแป้ง 2 – 3 หยด สารละลายจะเป็นสีน้ำเงิน ไทเทรตต่อจนกระทั่งสารละลายไม่มีสี บันทึกปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้

คำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน

สมการ

$$N_2 = \frac{(S \times N_1)}{I}$$

| | |
|-------------|--|
| เมื่อ N_2 | คือ ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน (นอร์มัล) |
| S | คือ ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรต (มิลลิลิตร) |
| N_1 | คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (นอร์มัล) |
| I | คือ ปริมาตรของสารละลายไอโอดีนที่ใช้ในการไทเทรต (มิลลิลิตร) |

วิธีวิเคราะห์การหาค่า Iodine Number

- ชั่งผงถ่านที่อบแห้งอุณหภูมิ 110 – 120 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น
- ใน โถคู่คความชื้น
- ชั่งและบันทึกน้ำหนักถ่านที่แน่นอนใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
 - เติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ปิดจุกและเขย่าให้เข้ากัน ต้มให้เดือดประมาณ 30 วินาที เพื่อไล่ซัลเฟอร์ ทิ้งไว้ ณ อุณหภูมิห้อง
 - เปิดสารละลายไอโอดีนมาตรฐาน 100 มิลลิลิตร เขย่าแรงๆ 30 วินาที
 - กรองสารละลายที่ได้อย่างรวดเร็วด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42
 - เปิดสารละลายไอโอดีนที่ผ่านการกรองปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
 - ไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอนแล้ว จนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนจากสีน้ำตาลเข้มเป็นสีน้ำตาลอ่อน เติมน้ำแข็ง 2-3 หยด จุดยุติคือ สารละลายเป็นสีใส ไม่มีสี บันทึกปริมาตรสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้

คำนวณหาค่าไอโอดีนนมเบอร์

สมการ

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

- เมื่อ X/M คือ ปริมาณไอโอดีนที่ถูกดูดซับต่อกรัมของถ่านที่ใช้ดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
- A คือ น้ำหนักทั้งหมดของไอโอดีนในสารละลายเริ่มต้น (มิลลิกรัม) ($N_2 \times 12693$)
- B คือ น้ำหนักของไอโอดีนที่ทำปฏิกิริยาสมมูลย์พอดีกับสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต 1 มิลลิลิตร ($N_1 \times 126.93$)
- S คือ ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ (มิลลิลิตร)
- M คือ ปริมาณถ่านที่ใช้ (กรัม)
- DF คือ ค่าคงที่ของการเจือจาง เท่ากับ 2.2

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์กรดไขมันอิสระ

วิธีการไทเทรชันด้วยวิธีมาตรฐาน AOCS Ca 5a-40

วิธีเตรียมสารละลาย

- 1) โซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้นร้อยละ 98 จำนวน 4 กรัม ละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 1 ลิตร
- 2) ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ หรือ IPA
- 3) ฟีนอล์ฟทาเลิน เข้มข้นร้อยละ 0.1

วิธีการวิเคราะห์กรดไขมันอิสระ (FFA)

- ชั่งน้ำหนักน้ำมัน 5 กรัม เติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ 25 มิลลิลิตร และหยดฟีนอล์ฟทาเลินอินดิเคเตอร์ 3-5 หยด เขย่ารวมกันในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร

- ไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ หยดสารละลายลงในขวดรูปชมพู่ พร้อมเขย่าให้เข้ากัน หยดจนกระทั่งสารละลายในขวดรูปชมพู่เปลี่ยนเป็นสีชมพูม่วง ประมาณ 30 วินาที บันทึกปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้

คำนวณหาค่าปริมาณกรดไขมันอิสระ

สมการ

$$FFA (\%) = \frac{25.6 \times V \times N}{W_{oil}}$$

เมื่อ V คือ ปริมาตรสารละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ (มิลลิลิตร)

N คือ ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (นอร์มัล)

W_{oil} คือ น้ำหนักของน้ำมันที่ใช้ (กรัม)

ประวัติผู้วิจัย

| | |
|------------------|--|
| ชื่อ – นามสกุล | นางสาวศศิประภา แก้วแดง |
| วัน เดือน ปีเกิด | 20 ธันวาคม 2534 |
| ที่อยู่ปัจจุบัน | บ้านเลขที่ 8/13 ถนน - ตำบล ศาลาแดง อำเภอ โกรกพระ จังหวัด นครสวรรค์ รหัสไปรษณีย์ 60170 |
| อีเมลล์แอดเดรส | sasi_kd@hotmail.com, sasi.kd20@gmail.com |
| ประวัติการศึกษา | พ.ศ. 2558 – 2560 หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมพลังงานทดแทน สถาบันการศึกษา มหาวิทยาลัยแม่โจ้ พ.ศ. 2553 – 2556 หลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา พลังงานทดแทน สถาบันการศึกษา มหาวิทยาลัยแม่โจ้ |