

นาโนพอร์สคาร์บอนจากใบปาล์มน้ำมันด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล
คาร์บอนไนเซชันร่วมกับการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์
สำหรับการดูดซับพาราควอต

NANOPOROUS CARBON FROM OIL PALM LEAVES VIA HYDROTHERMAL
CARBONIZATION COMBINED KOH ACTIVATION FOR
PARAQUAT ADSORPTION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2566

KMITL-2023-EN-M-220-039

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NANOPOROUS CARBON FROM OIL PALM LEAVES VIA HYDROTHERMAL
CARBONIZATION COMBINED KOH ACTIVATION FOR
PARAQUAT ADSORPTION



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2023

KMITL-2023-EN-M-220-039

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2023

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	นาโนพอร์สคาร์บอนจากไบโपाल์มน้ำมันด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันร่วมกับการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ สำหรับการดูดซับพาราควอต
นักศึกษา	นายศิราญุ จันปี
รหัสประจำตัว	63601259
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
พ.ศ.	2566
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.พรสวรรค์ อัครแสงรัตน์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รศ.ดร.อภิรักษ์ ณีเย็ดเอื้อ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเตรียมตัวดูดซับจากไบโपाल์มน้ำมัน ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เพื่อนำมาใช้ในการดูดซับพาราควอต ในงานนี้แบ่งกระบวนการออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ การเตรียมตัวดูดซับคาร์บอนและการศึกษาการดูดซับพาราควอต โดยขั้นตอนแรกเตรียมไบโपाल์มน้ำมันที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 160 - 200 องศาเซลเซียส และเวลา 6-24 ชั่วโมง พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการไฮโดรเทอร์มอลคือ อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เวลา 12 ชั่วโมง ต่อมากระบวนการคาร์บอนไนเซชัน ที่อุณหภูมิ 600 - 900 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน พบว่าเป็นภาวะที่เหมาะสมในคาร์บอนไนเซชัน คือ อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส จากนั้นกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของคาร์บอนต่อ KOH 1:0.25 1:1 และ 1:4 เวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน พบว่าในการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน 1:4 มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุดถึง 1681 ตารางเมตรต่อกรัม เป็นภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์นาโนพอร์สคาร์บอนจากไบโपाल์มน้ำมัน จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนผิว ความเป็นโครงสร้างอสัณฐานและความเป็นผลึก พบว่าคาร์บอนยังคงมีองค์ประกอบคาร์ และเฮมิเซลลูโลสบางส่วน มีการจัดตัวกันไม่เป็นระเบียบและประกอบไปด้วยคาร์บอน sp^2 ของกราฟไฟต์และการซ้อนชั้นของกราฟีน ขั้นตอนที่สองศึกษาการดูดซับพาราควอต ด้วยตัวดูดซับไบโपाल์มน้ำมันที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน 1:4 ใช้ตัวดูดซับ 0.5 กรัม ในสารละลายซึ่งมีความเข้มข้นของพาราควอต 5-400 ppm ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 25

องศาเซลเซียส จากผลการทดลองพบว่าที่ความเข้มข้นของพาราควอตที่ 400 มิลลิกรัมต่อกรัม เป็นเวลา 10 นาที ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุด ที่ 79 เปอร์เซ็นต์ ผลการศึกษาสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบจำลองไอโซเทอมของแลงมัวร์ แบบจำลองฟรุนดลิช แบบจำลองเทมคิน และแบบจำลองโจวานิกพบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) มีค่าเท่ากับ 0.916 0.906 0.898 และ 0.906 ตามลำดับ และผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ แบบจำลองการดูดซับของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม แบบจำลองการดูดซับของปฏิกิริยาอันดับสองเทียม แบบจำลองเอโลวิช และ แบบจำลองการแพร่กระจายระหว่างอนุภาคพบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) มีค่าเท่ากับ 0.997 0.999 0.998 และ 0.254 ตามลำดับ ศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ของตัวดูดซับ ด้วยกระบวนการไพโรไลซิส ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เวลา 3 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศออกซิเจนและไนโตรเจน พบว่ากระบวนการไพโรไลซิส ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เวลา 3 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ 4 ครั้ง โดยประสิทธิภาพลดลงครั้งหนึ่งแต่ยังสามารถใช้งานดูดซับได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Nanoporous Carbon from Oil Palm Leaves via Hydrothermal-Carbonization-Combined KOH Activation for Paraquat Adsorption
Student	Mr.Sirayu Chanpee
Student ID	63601259
Degree	Master of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2023
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr.Pornsawan Assawasaengrat
Thesis Co-Advisor	Assoc.Prof.Dr.Apiluck Eiad-ua

ABSTRACT

This research studied the preparation of sorbents from oil palm leaves. which is an agricultural waste material to be used to absorb paraquat in this work, the process was divided into 2 steps: carbon sorbent preparation and paraquat adsorption study. The first step was to prepare the hydrothermal process of oil palm leaves at 160-200 °C for 6-24 hours, it was found that the optimum condition for hydrothermal treatment was 200 °C. for 12 hours, followed by carbonization at 600 - 900 °C for 1 hour under nitrogen atmosphere. It was found that the optimum condition in carbonization was 800 °C, then activated with potassium hydroxide at the ratio by weight of carbon to KOH 1:0.25, 1:1, and 1:4 for 1 hour at 800 °C under nitrogen atmosphere. It was found that when activated with potassium hydroxide at the ratio of 1:4, the maximum specific surface area was 1681 m²/g. It is the ideal condition for the synthesis of nano-porous carbon from oil palm leaves. From the functional group analysis of the skin's amorphous structure and crystallinity, it was found that the carbon still had the tar component. and some hemicellulose the stabilizer is classified as disordered and consists of sp₂ carbon of graphite and layering of graphene. The second step was to study the adsorption of paraquat. The sorbent was treated with hydrothermal carbonization at 800 °C and activated with potassium hydroxide

at the ratio of 1:4. The concentration of paraquat was 5-400 ppm in a volume of 500 ml at a temperature of 25 °C. The results showed that at the concentration of paraquat at 400 mg/g for 10 minutes, the highest adsorption efficiency was 79 %. Study of adsorption isotherm equations Langmuir isotherm, Freundlich isotherm, Temkin isotherm, and the Jovanovic isotherm. The correlation coefficient (R^2) was 0.916, 0.906, 0.898, and 0.906, respectively. Adsorption model of a pseudo-first-order reaction Adsorption model of pseudo-second-order reactions Elovich model and interparticle diffusion model. It was found that the correlation coefficient (R^2) was 0.997 0.999 0.998 and 0.254 respectively. The pyrolysis process at 300 °C for 3 hours under an oxygen and nitrogen atmosphere showed that the pyrolysis process at 300 °C for 3 hours under a nitrogen atmosphere can be reused 4 times, with half the efficiency, but still able to absorb.



กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาและวิทยานิพนธ์เรื่อง นาโนโพรสคาร์บอนจากไบโพลัม น้ำมันที่ผ่านการกระตุ้น โฟแทสเซียมไฮดรอกไซด์แบบรวมไฮโดรเทอร์มอลคาร์โบไนเซชันสำหรับดูดซับสารพาราควอตสำเร็จจุลวง ได้ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง รศ.ดร.อภิสิทธิ์ เอียดเอื้อ วิทยาลัยเทคโนโลยีและนวัตกรรมวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ทั้งสองท่านที่ได้ให้คำแนะนำ ช่วยเหลือในเรื่องวิชาการ ให้คำแนะนำต่างๆ ในการแก้ปัญหา อีกทั้งยังสนับสนุนรอบด้านเอาใจใส่ และผลักดัน จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ของข้าพเจ้าสำเร็จจุลวงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ดร.นภัส แก้วตระกูลชัย สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่คอยดูแล ให้คำปรึกษาด้านการทดลองการเขียนงานวิจัยและการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ ให้คำแนะนำต่างๆ ในการแก้ปัญหา

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการคุมสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่เสนอแนะและแก้ไขโครงร่างวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถูกต้องสมบูรณ์ ขอขอบขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และขอขอบคุณวิทยาลัยเทคโนโลยีและนวัตกรรมวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังสำหรับการเอื้อเฟื้อเวลา อุปกรณ์ในงานวิจัยต่างๆ และสถานที่ในการทำวิจัยสุดท้ายนี้

ขอขอบพระคุณความรัก ความเข้าใจ และกำลังใจ อันทบอุ่นเสมอมาจากบิดา มารดา และครอบครัว ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญในการผลักดันให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จจุลวงไปได้ด้วยดี และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าเนื้อหาความรู้ จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์แก่ท่านผู้อ่านไม่มากนักน้อยสำหรับคุณงามความดีที่เกิดขึ้นจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ข้าพเจ้า ขอใช้บูชาคุณแก่ บิดา มารดา ครูบาอาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

ศิริยา จันปี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	III
กิตติกรรมประกาศ	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญภาพ.....	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	4
1.3 สมมุติฐานงานวิจัย.....	4
1.4 ขอบเขตการศึกษา.....	5
1.5 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	5
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	7
2.1 ต้นปาล์มน้ำมัน	7
2.2 ชีวมวล.....	8
2.3 ถ่านกัมมันต์.....	13
2.4 กระบวนการไฮโดรเทอร์มัล (HYDROTHERMAL).....	14
2.5 กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (CARBONIZATION).....	17
2.6 การผลิตถ่านกัมมันต์.....	18
2.7 กระบวนการดูดซับ	21
2.8 รูปแบบของไอโซเทอมการดูดซับ 6 รูปแบบ	22

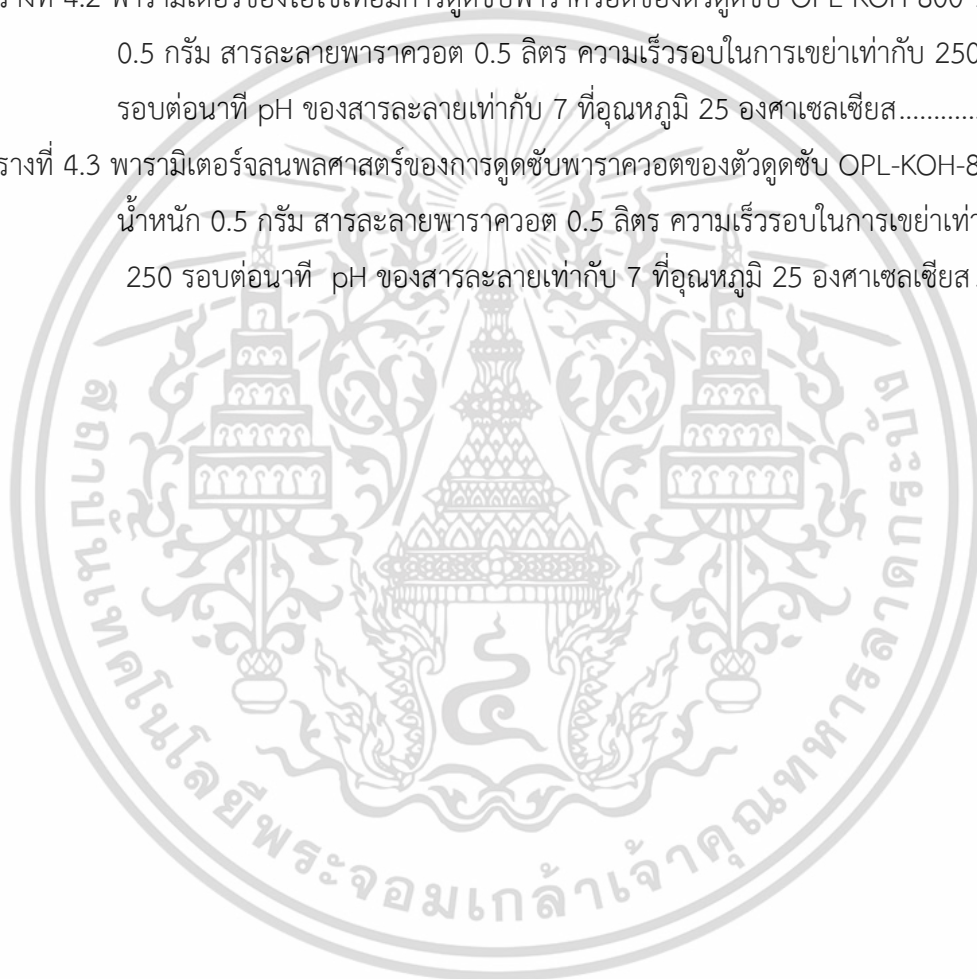
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น VI
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 การจำแนกขนาดรูปทรงตามมาตรฐาน IUPAC.....	24
2.10 แบบจำลองสมดุลการดูดซับ	25
2.11 แบบจำลองจลนพลศาสตร์	28
2.12 สารกำจัดศัตรูพืช (PESTICIDES).....	30
2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	34
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	37
3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	37
3.2 การเตรียม การสังเคราะห์ และการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ของไบโพลีเมอร์น้ำมัน	38
3.3 การทดสอบปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับพาราควอต.....	42
3.4 การนำกลับมาใช้ใหม่ของคาร์บอน	43
3.5 การตรวจวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ	43
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล.....	46
4.1 การศึกษาอุณหภูมิและเวลาของกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลของไบโพลีเมอร์น้ำมัน.....	46
4.2 การศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของไบโพลีเมอร์น้ำมันที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล.....	49
4.3 การศึกษาอุณหภูมิของกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชัน	51
4.4 การศึกษากระบวนการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์.....	54
4.5 การศึกษาการดูดซับของตัวรองรับคาร์บอน.....	65
4.6 การศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ของตัวดูดซับคาร์บอนที่ผ่านการใช้แล้ว	71
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	76
ประวัติผู้เขียน	78
บรรณานุกรม.....	81

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ Nitrogen adsorption-desorption ของคาร์บอนผ่านการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์.....	62
ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ของไอโซเทอมการดูดซับพาราควอตของตัวดูดซับ OPL-KOH-800-1:4 น้ำหนัก 0.5 กรัม สารละลายพาราควอต 0.5 ลิตร ความเร็วรอบในการเขย่าเท่ากับ 250 รอบต่อนาที pH ของสารละลายเท่ากับ 7 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	68
ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์จลนพลศาสตร์ของการดูดซับพาราควอตของตัวดูดซับ OPL-KOH-800-1:4 น้ำหนัก 0.5 กรัม สารละลายพาราควอต 0.5 ลิตร ความเร็วรอบในการเขย่าเท่ากับ 250 รอบต่อนาที pH ของสารละลายเท่ากับ 7 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	71



สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 ลักษณะของปาล์มน้ำมัน	7
รูปที่ 2.2 โครงสร้างเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ภายในชีวมวล	10
รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส	11
รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส	12
รูปที่ 2.5 สูตรโครงสร้างของ (a) trans-coniferyl alcohol (b) trans-p-sinapyl alcohol และ (c) tran-p-coumaryl alcohol.....	12
รูปที่ 2.6 ไอโซเทอมการดูดซับ	24
รูปที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของพาราควอต	32
รูปที่ 3.1 ระเบียบวิธีการเตรียม การสังเคราะห์ การกระตุ้นด้วยไพแทสเซียไฮดรอกไซด์ และ การศึกษาการดูดซับ.....	39
รูปที่ 4.1 ร้อยละผลได้ของไบปาล์มของไฮโดรคาร์ที่อุณหภูมิ 160 180 และ 200 ที่เวลา 6 12 และ	47
รูปที่ 4.2 กราฟ FT-IR ของไบปาล์มน้ำมัน (PL) ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ	48
รูปที่ 4.3 กราฟ XRD ของไบปาล์มน้ำมัน (PL) ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 6 (HT-200-6) 12 (HT-200-12) และ 24 (HT-200-24) ชั่วโมง.....	49
รูปที่ 4.4 กราฟ Thermogravimetric analysis (TGA) ของไบปาล์มน้ำมันที่ผ่านกระบวนการ การไฮโดรเทอร์มัล ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ที่เวลา 12 ชั่วโมง (HT-200-12).....	50
รูปที่ 4.5 กราฟ FT-IR ของไบปาล์มน้ำมันที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 12 ชั่วโมง (HT-200-12) และผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล คาร์บอนไนเซชันอุณหภูมิ 600 (HTC-600) 700 (HTC-700) 800 (HTC-800) และ 900 (HTC-900) องศาเซลเซียส.....	52
รูปที่ 4.6 กราฟ Raman spectroscopy ของไบปาล์มน้ำมันที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 12 ชั่วโมง และผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันที่ อุณหภูมิ 600 (HTC-600) 700 (HTC-700) 800 (HTC-800) และ 900 (HTC-900) องศาเซลเซียส.....	53
รูปที่ 4.7 กราฟ X-ray Diffractometer (XRD) ของไบปาล์มน้ำมันที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่ อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 12 ชั่วโมง (HT-200-12) และผ่านกระบวนการ การไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชัน ที่อุณหภูมิ 600 (HTC-600) 700 (HTC-700)	

800 (HTC-800) และ 900 (HTC-900) องศาเซลเซียส ใช้เวลา 1 ชั่วโมง ภายในบรรยากาศไนโตรเจน.....	54
รูปที่ 4.8 กราฟ Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR) ของไบโพลีเมอร์น้ำมันที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง (OPL-HTC-800) และกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน 1:0.25 (OPL-KOH-800-1:0.25) 1:1 (OPL-KOH-800-1:1) และ 1:4 (OPL-KOH-800-1:4) ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน	56
รูปที่ 4.9 กราฟ Ramam spectroscopy ของไบโพลีเมอร์น้ำมันที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง (OPL-HTC-800) และกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน 1:0.25 (OPL-KOH-800-1:0.25) 1:1 (OPL-KOH-800-1:1) และ 1:4 (OPL-KOH-800-1:4) ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน.....	57
รูปที่ 4.10 กราฟ XRD ของไบโพลีเมอร์น้ำมันที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง (OPL-HTC-800) และกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน 1:0.25 (OPL-KOH-800-1:0.25) 1:1 (OPL-KOH-800-1:1) และ 1:4 (OPL-KOH-800-1:4) ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน.....	58
รูปที่ 4.11 Nitrogen adsorption-desorption isotherm ของไบโพลีเมอร์น้ำมันที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง และกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน 1:0.25 (OPL-KOH-800-1:0.25) 1:1 (OPL-KOH-800-1:1) และ 1:4 (OPL-KOH-800-1:4) ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน	60
รูปที่ 4.12 แสดงการกระจายขนาดรูพรุนของคาร์บอนโดยใช้วิธีทฤษฎีฟังก์ชันความหนาแน่น Density Functional Theory (DFT) ของไบโพลีเมอร์น้ำมันที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง และกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่อัตราส่วน 1:0.25 (OPL-KOH-800-1:0.25) 1:1 (OPL-KOH-800-1:1) และ 1:4 (OPL-KOH-800-1:4) ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน.....	61

รูปที่ 4.13 ภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) กำลังขยาย 10,000 (a-d) และ 150,000 (e-h) เท่า ของใบปาล์ม น้ำมันที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง (OPL-HTC-800) (a, e) และกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน 1:0.25 (OPL-KOH-800-1:0.25) (b, f) 1:1 (OPL-KOH-800-1:1) (c, g) และ 1:4 (OPL-KOH-800-1:4) (d, h) ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน.....	64
รูปที่ 4.14 ภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน Field Emission Transmission Electron Microscope (FE-TEM) ของ OPL-KOH-800-1:4.....	65
รูปที่ 4.15 ประสิทธิภาพการกำจัดสารพาราควอตของตัวดูดซับ OPL-KOH-800-1:4 สภาวะในการดูดซับ คือ ปริมาณตัวดูดซับ 0.5 กรัม สารละลายพาราควอต 0.5 ลิตร ความเร็วรอบในการเขย่าเท่ากับ 250 รอบต่อนาที pH ของสารละลายเท่ากับ 7 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	66
รูปที่ 4.16 เส้นโค้งการดูดซับพาราควอตของตัวดูดซับ OPL-KOH-800-1:4 สภาวะในการดูดซับ คือ OPL-KOH-800-1:4 0.5 กรัม สารละลายพาราควอต 0.5 ลิตร ความเร็วรอบในการเขย่าเท่ากับ 250 รอบต่อนาที pH ของสารละลายเท่ากับ 7 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	67
รูปที่ 4.17 เส้นโค้งจลนพลศาสตร์การดูดซับพาราควอตของตัวดูดซับ OPL-KOH-800-1:4 สภาวะในการดูดซับ คือ OPL-KOH-800-1:4 0.5 กรัม สารละลายพาราควอต 0.5 ลิตร ความเร็วรอบในการเขย่าเท่ากับ 250 รอบต่อนาที pH ของสารละลายเท่ากับ 7 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	70
รูปที่ 4.18 ประสิทธิภาพการนำกลับมาใช้ใหม่ของตัวดูดซับ OPL-KOH-800-1:4 ที่ผ่านการดูดซับพาราควอต หลังจากใช้งานการดูดซับ-การคายซับ 4 ครั้ง สภาวะในการดูดซับ คือ ความเข้มข้นพาราควอตเริ่มต้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร OPL-KOH-800-1:4 0.5 กรัม สารละลายพาราควอต 0.5 ลิตร ความเร็วรอบในการเขย่าเท่ากับ 250 รอบต่อนาที pH ของสารละลายเท่ากับ 7 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	73
รูปที่ 4.19 กราฟ FT-IR ของตัวดูดซับ OPL-KOH-800-1:4 ที่ผ่านการดูดซับพาราควอต หลังจากการดูดซับ-การคายซับ 4 ครั้ง	74
รูปที่ 4.20 กราฟ XRD ของตัวดูดซับ OPL-KOH-800-1:4 ที่ผ่านการดูดซับพาราควอต หลังจากการดูดซับ-การคายซับ 4 ครั้ง	75

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ไบโพลัมน้ำมันที่ได้มาจากต้นปาล์มน้ำมัน (*Elaeis guineensis* Jacq.) เป็นแหล่งวัตถุดิบที่นำกลับมาใช้ใหม่ได้ในประเทศแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เช่น มาเลเซีย อินโดนีเซีย และไทย ไบโพลัมน้ำมันเป็นของเสียเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทหนึ่งที่ได้บ่อยที่สุดและมีปริมาณมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ที่มีการทำเกษตรกรรมปลูกปาล์มน้ำมัน การกำจัดไบโพลัมน้ำมันนั้นสามารถทำได้โดยการเผาแบบเปิดเป็นวิธีการดั้งเดิมในการกำจัดของเสียเหลือทิ้งจากการปลูกปาล์มน้ำมัน ส่งผลทำให้เกิดควัน ลดความอุดมสมบูรณ์ของดิน และส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศภายในประเทศและประเทศเพื่อนบ้านในระยะยาว วิธีการเผาแบบเปิดถูกห้ามใช้เนื่องจากส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้งในระยะสั้นและระยะยาว ปริมาณของเสียจากไบโพลัมน้ำมันที่เกิดขึ้นหลังกระบวนการเก็บเกี่ยวมีปริมาณเพิ่มขึ้นในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าวัตถุดิบมีอยู่เพียงพอสำหรับการนำมาสังเคราะห์ให้เป็นคาร์บอน เนื่องจากไบโพลัมน้ำมันเป็นของแข็งลิกโนเซลลูโลส (เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน) ที่ประกอบด้วยเส้นใยและ เนื้อเยื่อของไบโพลัมน้ำมันนั้น มีองค์ประกอบเป็นคาร์บอนประมาณ 30-40 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นแหล่งคาร์บอนที่มีปริมาณมาก องค์ประกอบทั้งหมดจะถูกเปลี่ยนแปลงเป็นสารประกอบคาร์บอน[1, 2]

คาร์บอนสามารถสังเคราะห์โดยการวิธีการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของสารอินทรีย์ที่ได้มาจากสิ่งมีชีวิตที่มีหลากหลายชนิดและรูปแบบ เช่น ชีวมวลที่ได้หรือเหลือใช้จากการเกษตร ได้แก่ ฟางข้าว เปลือกไม้ ชานอ้อย ใบสน กะลามะพร้าว เปลือกหน่อไม้ เศษไผ่ ข้าวโพด เต้าข้าวโพด แกลบ เปลือกถั่วลิสง [3] และไบโพลัมน้ำมัน[4] เป็นต้น ชีวมวลจัดเป็นแหล่งพลังงานทางเคมีที่เกี่ยวข้องกับอะตอมคาร์บอนและไฮโดรเจน โดยชีวมวลสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 สถานะ ได้แก่ ชีวมวลของแข็ง เชื้อเพลิงชีวภาพเหลว และก๊าซชีวมวล อย่างไรก็ตาม ความสามารถในการดูดซับสารกอมลพิษอินทรีย์ของคาร์บอนนั้นจะพิจารณาจากชนิดของสารชีวมวล สารมลพิษอินทรีย์ ความเป็นประจุบนพื้นผิว และสภาวะการกระตุ้นที่จะสามารถสร้างโครงสร้างรูพรุนในระดับนาโนเมตร คาร์บอนที่มีรูพรุนจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะค่อนข้างสูง ขนาดของรูพรุน และประจุบนพื้นผิว ส่งผลให้เกิดการดูดซับสารพิษอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นมากกว่าโครงสร้างปกติ โดยมีงานวิจัยที่นำคาร์บอนจากสารชีวมวลมาประยุกต์ใช้ในการดูดซับสารพิษและโลหะ

หนักที่อยู่ในน้ำ เช่น Mohamad และคณะ รายงานว่ามีการใช้คาร์บอนที่มีรูพรุนสังเคราะห์จากไบโपाल์ม น้ำมันเพื่อนำมากำจัดไกลโคซิลออกจากน้ำเสีย ต่อมา Abdulrhman และคณะ [1] รายงานว่าใช้ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากชีวมวลจากปาล์มซาบาลในการดูดซับเมทิลีนบลู และ Angel และคณะ [5] รายงานการใช้ชีวมวลจาก *Dioscorea rotundata* และ *Elaeis guineensis* สำหรับการกำจัดโครเมียม (VI) อย่างไรก็ตามวัสดุเหล่านี้มีข้อเสียคือไม่มีสัญญาณวิทยา พื้นที่ผิวจำเพาะต่ำและไม่มีรูพรุนในระดับนาโนเมตร ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับถูกจำกัดโดยโครงสร้างของคาร์บอน ต่อมาได้มีการประยุกต์ใช้คาร์บอนจากสารชีวมวลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพโดยปรับเปลี่ยนโครงสร้างให้ดีขึ้นโดยสังเคราะห์ให้เป็นวัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนระดับนาโนเมตร ข้อดีคือการดูดซับสารก่อมลพิษอินทรีย์โดยที่พื้นที่ผิวสูงจะช่วยส่งเสริมให้เกิดการถ่ายเทมวลระหว่างกระบวนการดูดซับ และสัญญาณวิทยา โครงสร้างให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับสารพิษอินทรีย์เพื่อขจัดสารก่อมลพิษอินทรีย์ออกจากน้ำ

ในช่วงสิบปีที่ผ่านมาของเหลือทิ้งทางการเกษตรซึ่งมีอยู่ในธรรมชาติมีแนวโน้มที่ดีในการสังเคราะห์คาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนเมตร ได้มีการวิจัยอย่างกว้างขวาง ในงานวิจัยนี้ได้ใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลเพื่อใช้ควบคุมลักษณะทางสัญญาณวิทยาของคาร์บอนและเป็นการเตรียมโครงสร้างของคาร์บอน ซึ่งช่วยเพิ่มปริมาณคาร์บอนได้ดี โดยได้มาจากสลายตัวของ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน กระบวนการนี้ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในการสังเคราะห์คาร์บอน กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลหรือที่เรียกว่า วิธีไพโรไลซิสแบบเปียก จะให้ความร้อนที่อุณหภูมิระหว่าง 150 ถึง 250 องศาเซลเซียส [6] โดยน้ำก็ร่วมกับลิกโนเซลลูโลสที่เป็นพอลิเมอร์ ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลทำให้เกิดกระบวนการ ไฮโดรไลซิส ดีคาร์บอกซิเลชัน พอลิเมอไรเซชัน และอะโรมาไทเซชัน [7] พร้อมกันทำให้เกิดการคาร์บอน ต่อมากระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ ตั้งแต่ 400 ถึง 1,100 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศที่ไม่มีออกซิเจน โดยตัวแปรในการทดลอง ได้แก่ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา เวลา อัตราการไหลของแก๊ส และอัตราการให้ความร้อน กระบวนการคาร์บอนไนเซชันถูกนำมาใช้เพื่อเตรียมถ่านกัมมันต์ [8, 9] มีรายงานวิจัยการใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันสำหรับการแปลงชีวมวล กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันใช้น้ำที่ต่ำกว่าจุดวิกฤต เพื่อแปลงชีวมวลแบบเปียกและแห้งไปเป็นไฮโดรคาร์บอที่มีปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนสูง โดยทั่วไป ผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอของไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันจะปรับปรุงด้วยการกระตุ้นเพิ่มเติม เพื่อปรับเปลี่ยนโครงสร้างคาร์บอนที่มีรูพรุนระดับนาโนเมตร อุณหภูมิที่ค่อนข้างต่ำและไม่จำเป็นต้องใช้ชีวมวลแบบแห้ง การทำไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันของสารชีวมวลเป็นวิธีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมในการเตรียมคาร์บอนที่มีรูพรุนระดับนาโนเมตร ที่มีต้นทุนต่ำ ความแตกต่างหลักระหว่างสองขั้นตอนนี้ คือ การกระตุ้นทางเคมีและการกระตุ้นทางกายภาพ ทำได้

โดยใช้ตัวทำปฏิกิริยาทางกายภาพ ได้แก่ ไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ หรือก๊าซออกซิเจนบางส่วน เพื่อให้สารตั้งต้นของคาร์บอนออกไซด์บางส่วนที่อุณหภูมิสูง 700-1,000 องศาเซลเซียส การกระตุ้นทางเคมีสามารถใช้ได้ทั้งกรดและเบส ขึ้นอยู่กับการควบคุมขนาดของรูพรุนของคาร์บอน โดยใช้สารเคมีต่างๆ เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ [10] ซิงค์คลอไรด์ และกรดฟอสฟอริก [11, 12] เป็นตัวกระตุ้นผลการศึกษางานวิจัยแสดงให้เห็นว่าการใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นสารกระตุ้นเพิ่มการพัฒนาโครงสร้างรูพรุนอย่างมีนัยสำคัญโดยมีพื้นที่ผิวที่ใหญ่ขึ้นในคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนเมตร

การปนเปื้อนของสารกำจัดศัตรูพืชในน้ำเป็นหัวข้อด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญเนื่องจากเป็นภัยคุกคามในระบบนิเวศ สารกำจัดศัตรูพืช พาราควอต (1,1-dimethyl-4,4-bipyridinium dichloride; $C_{12}H_{14}Cl_2N_2$) เป็นหนึ่งในสารกำจัดวัชพืชที่ใช้อย่างแพร่หลายในการผลิตพืชผลทางการเกษตรทั่วโลก เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการกำจัดวัชพืชที่ดีและต้นทุนต่ำ พาราควอตเป็นอันตรายต่อมนุษย์และก่อให้เกิดมลพิษต่อแหล่งน้ำทั้งแม่น้ำและน้ำใต้ดิน มีการคาดการณ์ว่าการใช้สารกำจัดศัตรูพืชจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น การปนเปื้อนของพาราควอตในอาหารและน้ำเป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์ แม้ในระดับความเข้มข้นเพียงเล็กน้อย จะส่งผลให้เกิดโรคมะเร็งกับปอด ไต และตับ [13-17] การจัดการพาราควอตได้มีการเผยแพร่เทคนิคที่ใช้มีสองวิธีการ คือ การลดและการขจัด วิธีที่หนึ่งการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง [18, 19] เช่น กระบวนการโฟโตเพนตัน ซึ่งมีข้อเสียคือเป็นวิธีการที่ใช้พลังงานสูง เวลานาน ต้นทุนสูง และวิธีที่สองการดูดซับโดยวัสดุที่มีรูพรุน [20, 21] เช่น ดินเหนียว ซีโอไลต์ และคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนเมตร เป็นวิธีการที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากใช้งานง่าย ต้นทุนต่ำ ใช้พลังงานต่ำ ประสิทธิภาพสูง สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และสร้างความได้เปรียบทางเศรษฐกิจ การดูดซับโดยใช้คาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนเมตร จึงเป็นวิธีที่ดีที่สุดในการกำจัดสารกำจัดศัตรูพืชออกจากน้ำ วิธีการอื่นๆ มีค่าใช้จ่ายสูง อาจเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและสิ่งมีชีวิต และมีวิธีการที่ยากที่จะนำกลับมาใช้ใหม่

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อเตรียมคาร์บอนจากไบโपाल์ม้ำมันที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง และมีรูพรุนระดับนาโนเมตร เพื่อใช้เป็นตัวดูดซับพาราควอตในน้ำเสีย ไบโपाल์ม้ำมันที่มีพื้นที่ผิวสูงสุดได้รับการปรับปรุงโครงสร้าง โดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนเซชันที่ 800 องศาเซลเซียส ที่เวลา 1 ชั่วโมง และกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่มีอัตราส่วนน้ำหนักต่างกัน 1:0.25 1:1 และ 1:4 (คาร์บอนต่อโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์; กรัมต่อกรัม) ไบโपाल์ม้ำมันที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุด มีรูพรุนที่มีขนาดนาโนเมตร และปริมาณคาร์บอน ถูกนำไปใช้กับการดูดซับพาราควอตในน้ำ ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัด สมดุลไอโซเทอมการดูดซับ จลนพลศาสตร์ และการนำกลับมาใช้ใหม่ของคาร์บอนที่มีรูพรุนขนาดนาโนเมตร เพื่อประเมินประสิทธิภาพของไบโपाल์ม้ำมันที่เตรียมไว้ การศึกษานี้จะช่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พัฒนาการประยุกต์ใช้ของเสียเหลือทิ้งจากไบโอดีเซลน้ำมันที่มีอยู่อย่างมากมาย และบรรลุเป้าหมายในการพัฒนาที่ยั่งยืนเพื่อจัดการของเสียเหลือทิ้งและสารกำจัดศัตรูพืชพาราควอตในน้ำ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1. เพื่อศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มัลที่มีผลต่อการสังเคราะห์ไบโอชาร์จากไบโอดีเซลน้ำมัน
- 1.2.2. เพื่อศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิในการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันที่มีผลต่อการสังเคราะห์คาร์บอนจากไบโอดีเซลน้ำมัน
- 1.2.3. เพื่อศึกษาปัจจัยของอัตราส่วนโดยน้ำหนักของคาร์บอนต่อโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ส่งผลต่อการสังเคราะห์คาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนเมตรจากไบโอดีเซลน้ำมัน
- 1.2.4. เพื่อศึกษาการดูดซับพาราควอตจากคาร์บอนที่เตรียมได้ และการนำกลับมาใช้ใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.3 สมมุติฐานงานวิจัย

- 1.3.1. ถ้าอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลต่อโครงสร้างของนาโนพอร์สคาร์บอน ทำให้มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงขึ้น ขนาดของรูพรุน โครงสร้างรูพรุน และความเป็นคาร์บอนเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้การดูดซับดีขึ้น
- 1.3.2. นาโนพอร์สคาร์บอนที่ผ่านการกระตุ้นด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะทำให้มีรูพรุนเปิดกว้างเพิ่มขึ้นและเหมาะสมกับขนาดสารอินทรีย์ที่จะดูดซับ ส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถกระจายตัวได้เพิ่มขึ้นและประสิทธิภาพการดูดซับดีขึ้นด้วย

1.4 ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยนี้จำกัดขอบเขตของงานในส่วนการวิจัยและพัฒนาการทดลอง เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของไบโพลีเมอร์นำมันโดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชัน ใช้เงื่อนไขที่จะทำการทดลองเพื่อศึกษาอุณหภูมิและเวลาในการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชัน และใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในการกระตุ้น โดยปรับเปลี่ยนอุณหภูมิและเวลาของกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันที่จะส่งผลกระทบต่อพื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดของรูพรุน และโครงสร้างของรูพรุนของนาโนพอร์สคาร์บอนที่มีส่งผลกระทบต่อตัวดูดซับให้สามารถพัฒนาความเป็นรูพรุนในระดับนาโนเมตร และคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนเมตรจากไบโพลีเมอร์นำมันที่สังเคราะห์ได้ นำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวดูดซับสารอินทรีย์ เช่น พาราควอตได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น และการนำกลับมาใช้ใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.5 แผนการดำเนินงานวิจัย

- 1.5.1. ศึกษาค้นคว้าข้อมูลงานวิจัยที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการนำไบโพลีเมอร์นำมันมาทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันร่วมกับการกระตุ้นทางเคมี
- 1.5.2. การเตรียมไบโพลีเมอร์นำมันสำหรับการสังเคราะห์ โดยตัดไบโพลีเมอร์นำมัน ขนาด 0.5×0.5 เซนติเมตร บดและร่อนผ่านตะแกรงขนาดช่อง 500 ไมโครเมตร จากนั้นอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง
- 1.5.3. ศึกษาปัจจัยในการสังเคราะห์คาร์บอนจากไบโพลีเมอร์นำมันโดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลนำไบโพลีเมอร์นำมัน 30 กรัม ผสมน้ำปราศจากไอออน 30 มิลลิลิตร โดยใช้เงื่อนไขของอุณหภูมิและเวลา ที่อุณหภูมิ 160 180 และ 200 องศาเซลเซียส และเวลา 6 12 และ 24 ชั่วโมง หลังจากกระบวนการ อบแห้ง ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง
- 1.5.4. ศึกษาปัจจัยในการสังเคราะห์คาร์บอนจากไบโพลีเมอร์นำมันโดยกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน โดยใช้เงื่อนไขของอุณหภูมิ ดังนี้ 600 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และภายใต้สภาวะบรรยากาศไนโตรเจนที่ความเร็วการไหลของแก๊ส 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

- 1.5.5. ศึกษาปัจจัยในการสังเคราะห์คาร์บอนที่มีรูพรุนระดับนาโนเมตรจากไบโपाल์มน้ำมัน โดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันและกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้เงื่อนไข ดังนี้ 1:0.25 1:1 และ 1:4 (คาร์บอน:โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์) บดผสมเวลา 15 นาที จากนั้นกระบวนการแคลซิเนชัน ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และภายใต้สภาวะบรรยากาศไนโตรเจน ที่ความเร็วการไหลของแก๊ส 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที
- 1.5.6. ศึกษาเครื่องมือวิเคราะห์จากไบโपाल์มน้ำมันโดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันและกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่เงื่อนไขต่างๆ โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ ดังนี้ FT-IR Raman BET XRD FE-SEM FE-TEM และ TGA
- 1.5.7. ศึกษาการทดสอบปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับพาราควอต โดยใช้ความเข้มข้นของพาราควอตระหว่าง 5-400 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เวลา 0-180 นาที ปริมาณตัวดูดซับ 0.5 กรัม สารละลายพาราควอต 0.5 ลิตร ความเร็วรอบในการเขย่าเท่ากับ 250 รอบต่อนาที pH ของสารละลายเท่ากับ 7 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จากนั้นศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ และศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ
- 1.5.8. ศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ของคาร์บอน ด้วยกระบวนการไพโรไลซิส ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เวลา 3 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศออกซิเจนและไนโตรเจน จากนั้นศึกษาประสิทธิภาพการนำกลับมาใช้ใหม่ของคาร์บอน และตรวจเครื่องมือวิเคราะห์ FTIR Raman และ XRD เปรียบเทียบคาร์บอนก่อนใช้และหลังการนำกลับมาใช้ใหม่
- 1.5.9. สรุปผลการวิจัยพร้อมทั้งจัดทำเล่ม ปรินต์

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1. สามารถสังเคราะห์นาโนคาร์บอนจากไบโपाल์มน้ำมันที่มีขนาดในระดับนาโนเมตร
- 1.6.2. สร้างคุณค่าและเพิ่มมูลค่าให้แก่ทรัพยากรธรรมชาติ
- 1.6.3. สามารถนำตัวดูดซับที่สังเคราะห์ได้ไปประยุกต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- 1.6.4. สร้างทางเลือกใหม่ให้กับชีวมวลที่เหลือใช้จากการเกษตร
- 1.6.5. ประยุกต์ใช้ดูดซับสารกำจัดศัตรูพืชพาราควอตและนำกลับมาใช้ใหม่

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ต้นปาล์มน้ำมัน



รูปที่ 2.1 ลักษณะของปาล์มน้ำมัน

ชื่อวิทยาศาสตร์ : *Elaeis guineensis*

ชื่อสามัญ : ต้นปาล์มน้ำมัน

วงศ์ : Arecaceae

สกุล : *Elaeis* Jacq.

ต้นปาล์มน้ำมัน [22] มาจากแหล่งวัตถุดิบในประเทศแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เช่น มาเลเซีย อินโดนีเซีย และไทย เป็นแถบที่มีการผลิตเยอะที่สุด ใบปาล์มน้ำมันเป็นของเสียเหลือทิ้งทางการเกษตร ประเภทหนึ่งที่ได้บ่อยที่สุดและมีปริมาณมาก ในพื้นที่ที่มีการทำเกษตรกรรมปลูกต้นปาล์มน้ำมัน การกำจัดใบปาล์มน้ำมัน สามารถทำได้โดยการเผาแบบเปิด เป็นวิธีการดั้งเดิมในการกำจัดของเสียเหลือทิ้งจากการปลูกต้นปาล์มน้ำมัน ส่งผลทำให้เกิดควัน ลดความอุดมสมบูรณ์ของดินและส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศภายในประเทศและประเทศเพื่อนบ้าน ต้นปาล์มน้ำมันเป็นพืชตระกูลปาล์ม ลักษณะลำต้นเดี่ยว ขนาดลำต้นประมาณ 12-20 นิ้ว เมื่ออายุประมาณ 1-3 ปี ลำต้นจะถูกหุ้มด้วยโคนกาบใบ เมื่ออายุมากขึ้น โคนกาบใบจะหลุดร่วงเห็นลำต้นชัดเจน ผิวของลำต้นคล้ายๆ ต้นตาล ลักษณะใบเป็นรูปก้างปลา โคนกาบ

ไบจะมีลักษณะเป็นซี คัลลายหนามแต่ไม่คมมาก เมื่อไปถึงกลางไบหนามดังกล่าวจะพัฒนาเป็นไบ การออกดอกเป็นพืชที่แยกเพศคือต้นที่เป็นเพศผู้ก็จะให้เกสรตัวผู้อย่างเดียว ต้นที่ให้เกสรตัวเมียจะติดผลผลิตปาล์มน้ำมันสามารถนำมาแปรรูป เป็นน้ำมันพืชที่ใช้ในการประกอบอาหารและใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมอาหารต่างๆ เช่น ขนมขบเคี้ยว บะหมี่กึ่งสำเร็จรูป นมข้นหวาน ครีม เนยเทียม และวัตถุดิบในการผลิตพลังงานทดแทน ไบโอดีเซล รวมถึงเป็นส่วนผสมในเพื่อช่วยลดการใช้ น้ำมันดีเซล เพิ่มความมั่นคงทางด้านพลังงานให้กับประเทศ อีกทั้งยังช่วยลดปัญหาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ยังสามารถแปรรูปเป็น สบู่ ผงซักฟอก เครื่องสำอาง ผลิตภัณฑ์เคมีภัณฑ์ต่างๆ และอาหารสัตว์ โดยนำไบต้นปาล์มน้ำมันมาบดเป็นอาหารสัตว์ กะลาปาล์มน้ำมันเป็นวัตถุดิบเชื้อเพลิง ทะลายปาล์มน้ำมันใช้เพาะเห็ด และการปลูกปาล์มน้ำมันช่วยในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในการช่วยลดภาวะโลกร้อนได้อีกทางหนึ่ง

2.2 ชีวมวล

ชีวมวล (Biomass) [23, 24] คือ สารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติ และสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ ชีวมวลได้มาจากพืชและสัตว์ต่างๆ เช่น เศษไม้ ขยะ และวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร การใช้งานชีวมวล เพื่อทำให้ได้พลังงานโดยนำมาเผาไหม้ให้ได้พลังงานความร้อนที่ได้ไปใช้ในการกระบวนการผลิตไฟฟ้าทดแทนพลังงานจากฟอสซิล ซึ่งมีอยู่อย่างจำกัดและอาจหมดลงได้ ชีวมวลมีแหล่งที่มาต่างกัน เช่น พืชผลทางการเกษตร (Agricultural crops) เศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร (Agricultural residues) ไม้ และเศษไม้ (Wood and wood residues) หรือของเหลือจากจากอุตสาหกรรมและชุมชน เช่น แกลบ ได้จากการสีข้าวเปลือก ชานอ้อยได้จากการผลิตน้ำตาลทราย ส่าเหล้าได้จากการผลิตแอลกอฮอล์ เศษไม้ได้จากการแปรรูปไม้อย่างพาราหรือไม้ยูคาลิปตัส และบางส่วนได้จากสวนป่าที่ปลูกไว้ กากปาล์มน้ำมัน ได้จากการสกัดน้ำมันปาล์มดิบออกจากผลปาล์มน้ำมันสด กากมันสำปะหลังได้จากการผลิตแป้งมันสำปะหลัง ชังข้าวโพดได้จากการสีข้าวโพดเพื่อนำเมล็ดออก กาบและกะลามะพร้าวได้จากการนำมะพร้าวมาปลอกเปลือกออกเพื่อนำเนื้อมะพร้าวไปผลิตกะทิและน้ำมันมะพร้าว เป็นต้น

2.2.1 องค์ประกอบของชีวมวล

องค์ประกอบของชีวมวล [25] จะแบ่งออกเป็น 4 ส่วนหลัก คือ ความชื้น เถ้า ไอรอะเหย และคาร์บอนคงตัว

ก. ความชื้น

ความชื้น (Moisture) คือ ปริมาณความชื้นในชีวมวลเป็นคุณสมบัติที่สำคัญมาก ในการนำชีวมวลไปใช้เป็นเชื้อเพลิง ปริมาณความชื้นมากจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลง ปริมาณความชื้นในชีวมวล วิเคราะห์ได้จากน้ำหนักที่หายไป หลังการอบชีวมวลให้แห้งที่อุณหภูมิ 105-110 องศาเซลเซียส โดยทั่วไปจะทำการอบชีวมวลในเตาอบไฟฟ้าจนกว่าชีวมวลจะแห้งหรือน้ำหนักของชีวมวลคงที่ โดยน้ำหรือความชื้น จะระเหยออกมาจากชีวมวลระหว่างที่ทำการอบแห้ง โดยปริมาณความชื้นในชีวมวลจะขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล ปริมาณความชื้นในชีวมวล ประเภทไม้ มีตั้งแต่ร้อยละ 25-65 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของชีวมวล ชีวมวลประเภทกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสีย (Sludge) จะมีปริมาณความชื้นสูงมากกว่าร้อยละ 90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของชีวมวล

ข. ปริมาณเถ้า

ปริมาณเถ้า (Ash) ในชีวมวลเป็นคุณสมบัติที่สำคัญอีกประการหนึ่ง ในการนำชีวมวลไปใช้เป็นเชื้อเพลิง ชีวมวลมีปริมาณเถ้ามากจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลงปริมาณเถ้าในชีวมวล วิเคราะห์ได้จากน้ำหนักที่เหลืออยู่จากการเผาไหม้ชีวมวล ภายใต้บรรยากาศอากาศ ที่อุณหภูมิ 575 องศาเซลเซียส เวลาไม่น้อยกว่า 3 ชั่วโมง ส่วนประกอบอินทรีย์ในชีวมวลจะถูกเผาไหม้สมบูรณ์ กลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ในขณะที่ส่วนประกอบอนินทรีย์ในชีวมวลจะถูกออกซิไดซ์ กลายเป็นสารประกอบออกไซด์ เรียกว่า เถ้า

ค. ปริมาณไอรอะเหย

ปริมาณไอรอะเหย (Volatile Matter) ในชีวมวลเป็นน้ำหนักที่หายไปหลังจากการให้ความร้อนแก่ชีวมวล ภายใต้สภาวะที่กำหนด คือ อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เวลา 7 นาที หรือจนกว่าน้ำหนักจะคงที่ โดยไม่ให้ชีวมวลสัมผัสกับอากาศไอรอะเหย จะเกิดขึ้นจากการกลั่นสลายด้วยความร้อนหรือไพโรไลซิส (Pyrolysis)

ง. ปริมาณคาร์บอนคงตัว

ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) เป็นส่วนที่เสถียรของโครงสร้างชีวมวล หลังจากการให้ความร้อนแก่ชีวมวล ที่อุณหภูมิระหว่าง อุณหภูมิห้อง ถึง 900 องศาเซลเซียส ซึ่งส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยธาตุคาร์บอน ปริมาณคาร์บอนคงตัว

2.2.2 องค์ประกอบทั่วไปของสารชีวมวล

องค์ประกอบทั่วไปของสารชีวมวล [26] นั้นมีหลากหลายชนิดองค์ประกอบหลักคือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน แป้ง และโปรตีน แสดงดังรูปที่ 2.2 ปริมาณขององค์ประกอบในชีวมวลแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล ชนิดของเนื้อเยื่อ และสภาวะการเจริญเติบโตของพืช ซึ่งชีวมวลมีปริมาณ ออกซิเจนสูงเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงฟอสซิล โดยน้ำหนักชีวมวลแห้งประกอบด้วย ออกซิเจน 30-40 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอน 30-60 เปอร์เซ็นต์ และไฮโดรเจนขึ้นอยู่กับปริมาณเถ้า 5-6 เปอร์เซ็นต์ ส่วนไนโตรเจน กำมะถัน และคลอรีนมีปริมาณน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ และสามารถพบได้ในโครงสร้างของชีวมวลบางชนิด



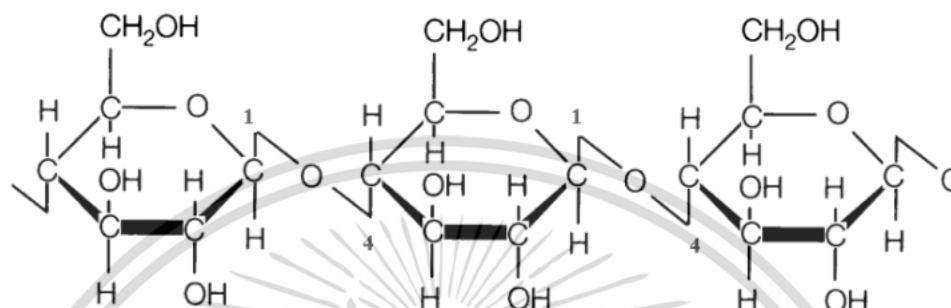
รูปที่ 2.2 โครงสร้างเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ภายในชีวมวล

ก. เซลลูโลส (Cellulose)

เซลลูโลส (Cellulose) มีสูตรโมเลกุลคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ แสดงดังรูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีปริมาณมากที่สุดในโลกชนิดหนึ่ง พอลิเมอร์เซลลูโลสนี้ประกอบด้วย D-กลูโคส หน่วยย่อยที่เชื่อมโยงกันด้วยการเกิดพันธะ β -1,4 glycosidic ต่อกันเป็นโซ่ยาว เชื่อมโยงกันด้วยพันธะไฮโดรเจน และแวนเดอร์วาลส์ มีตีดกรีโพลิเมอร์ไรซ์สูง มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เซลลูโลสเป็นสารที่ไม่ละลายในน้ำที่อุณหภูมิห้อง แต่สามารถละลายได้บางส่วนที่อุณหภูมิ 302 องศาเซลเซียส และสามารถละลายได้อย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 330 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะวิกฤติของน้ำ เนื่องจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

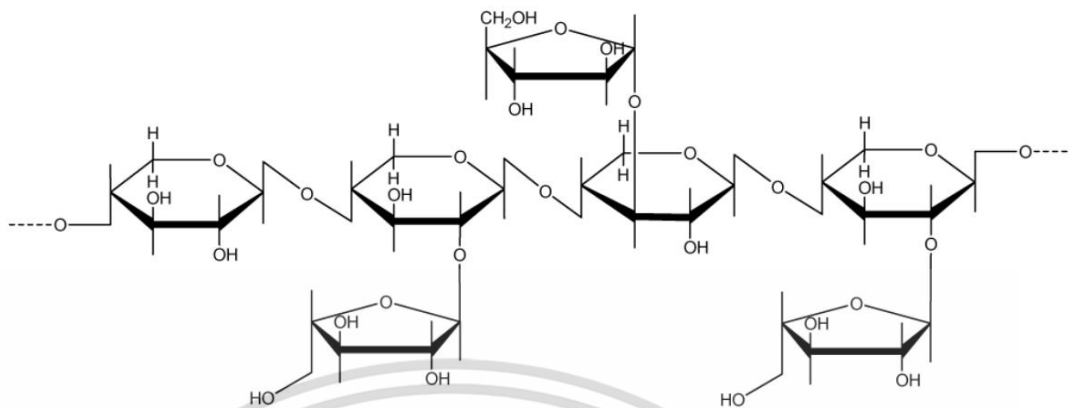
โครงสร้างของเส้นใยเกิดขึ้นจากพันธะไฮโดรเจน เซลลูโลสมี คุณสมบัติไม่ละลายในน้ำ สารอินทรีย์ และ สารละลายเบสอ่อนหรือกรดอ่อน แต่สามารถละลายได้ดีใน กรดแก่หรือต่างแก่



รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส

ข. เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

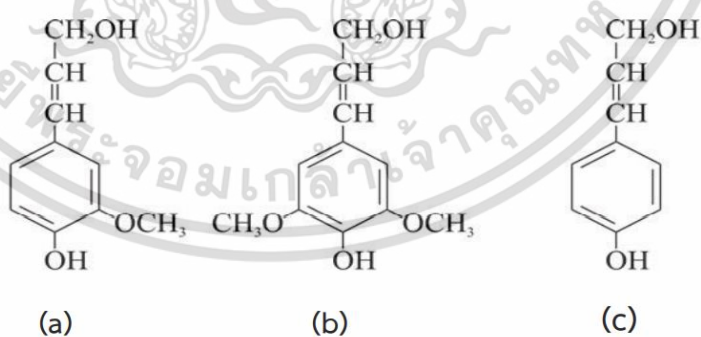
เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) มีสูตรโมเลกุลคือ $(C_5H_8O_4)_n$ แสดงดังรูปที่ 2.4 ประกอบด้วย หน่วยโมโนโซชาไรด์ที่แตกต่างจากเซลลูโลส นอกจากนี้โซพอลิเมอร์ของเฮมิเซลลูโลสมีกิ่งก้านสั้นและมีรูปร่างไม่แน่นอนเนื่องจากสัณฐานวิทยา เฮมิเซลลูโลสจะละลายได้บางส่วน เฮมิเซลลูโลสเป็นเฮเทอโรพอลิแซ็กคาไรด์ ไม่เป็นผลึก โดยธรรมชาติจะมีโครงสร้างแบบ Amorphous เฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยน้ำตาลหลายชนิด ซึ่งมีน้ำตาลไซโลส (Xylose) แมนแนน (Mannans) ซึ่งมีน้ำตาลแมนโนส (Mannose) และกาแลคแทน (Galactans) ซึ่งประกอบด้วยน้ำตาลกาแลคโตส (Galactose) นอกจากนั้นยังมีกลูโคแมนแนน ซึ่งประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสและน้ำตาลแมนโนส ไฮโลกลูแคน ประกอบด้วยน้ำตาลไซโลสและน้ำตาลกลูโคส และแคลโลส (Callose) จัดเป็นเฮมิเซลลูโลส ซึ่งประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสที่เกาะกันแบบ β -1,3-glycosidic bond ซึ่งจะพบบริเวณปลายเซลล์ของท่ออาหาร (Sieve tubes)



รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส

ค. ลิกนิน

ลิกนิน เป็นสารประกอบประเภทอะโรมาติก ที่พบในส่วนผนังเซลล์ของพืช ในปริมาณที่แตกต่างไปตามชนิดของพืช ในธรรมชาติลิกนินเป็นส่วนป้องกันเซลลูโลส ไม่ให้ถูกย่อยสลายได้ง่ายโดยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ ลิกนินเป็นเฮเทอโรพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบ 3 มิติ ไม่ตกผลึก ประกอบด้วยสารประกอบอะโรมาติก 3 ชนิด ประกอบด้วย *trans-p-coumaryl alcohol*, *trans-coniferyl alcohol* และ *trans-p-sinapyl alcohol* นอกจากนี้โมเลกุลของลิกนิน ยังเชื่อมต่อกับสารประกอบอะโรมาติกอื่น เช่น *vanillin* และ *syringaldehyde* สูตรโครงสร้างของ *trans-p-coumaryl alcohol*, *trans-coniferyl alcohol* และ *trans-p-sinapyl alcohol* แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 สูตรโครงสร้างของ (a) *trans-coniferyl alcohol* (b) *trans-p-sinapyl alcohol* และ (c) *trans-p-coumaryl alcohol*

2.3 ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) [27] คือ วัสดุที่มีพื้นที่ผิวภายในและมีความพรุนสูง เป็นการนำเอาวัตถุดิบธรรมชาติที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ มาผ่านกระบวนการก่อกัมมันต์ ซึ่งทำให้วัตถุดิบนั้นมีโครงสร้างรูพรุนและมีพื้นที่ผิวสูง ซึ่งพื้นที่หน้าตัดของถ่านกัมมันต์ จะมีลักษณะคล้ายรังผึ้ง โดยถ่านกัมมันต์จะมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักและมีธาตุอื่นที่เป็นองค์ประกอบ คือ ไฮโดรเจน ออกซิเจน ซัลเฟอร์และไนโตรเจน โดยจะมีปริมาณขึ้นอยู่กับปริมาณที่มีในวัตถุดิบและอาจเกิดขึ้นได้อีก ในขั้นตอนการผลิต ดังนั้นจึงมีความสามารถในการดูดซับสารเคมีจากก๊าซและของเหลว ได้ในปริมาณสูง ถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่อยู่ในรูปคาร์บอนอสัณฐาน (Amorphous carbon) แต่ถูกทำขึ้นมาเป็นพิเศษโดยกระบวนการก่อกัมมันต์ (Activation) ซึ่งทำให้พื้นที่ผิวภายใน (Internal surface area) เพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากโครงสร้างที่เป็นรูพรุนจำนวนมากและมีความสามารถในการดูดซับสูง เนื่องจากพื้นที่ผิวมากมีความจุในการดูดซับสูงผิวโครงสร้างเป็นแบบรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากและมีความสามารถในการดูดซับสูง

ก. ถ่านกัมมันต์แบบผง (Powder Activated Carbon)

ถ่านกัมมันต์แบบผง (Powder Activated Carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ถูกนำมาบดจนสามารถผ่านตะแกรงร่อนขนาด 10-50 ไมโครเมตร ไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก มีลักษณะเป็นผงโดยทั่วไปจะมีขนาด 0.15 0.25 มิลลิเมตร นิยมใช้ในการดูดซับสารในสถานะแก๊สหรือของเหลว เช่น การฟอกสี การดูดซับกลิ่นระเหยง่าย และดูดกลิ่นในของเหลว

ข. ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดหรือเม็ด (Granular Activated Carbon)

ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดหรือเม็ด (Granular Activated Carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ทำจากวัตถุดิบที่เป็นเม็ดหรือเป็นถ่านกัมมันต์แบบผง นำมาเติมตัวประสานทำให้เป็นเม็ด สามารถผ่านตะแกรงร่อนขนาด 20 ตารางเซนติเมตร ได้ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก และสามารถผ่านตะแกรงร่อนขนาด 40 ตารางเซนติเมตร ได้ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดหรือเม็ด ที่ใช้งานมานานจนประสิทธิภาพลดลง สามารถนำไปทำการฟื้นฟูสภาพ เพื่อทำให้มีประสิทธิภาพการดูดซับที่ผิวมากขึ้น ถ่านกัมมันต์แบบนี้นิยมใช้เป็นไส้กรองในเครื่องกรองน้ำ

ค. ถ่านกัมมันต์แบบเป็นแท่ง (Extruded)

ถ่านกัมมันต์แบบเป็นแท่ง (Extruded) นิยมใช้ในเบตนิ่งเพื่อการดูดซับสารปนเปื้อนที่ต้องการอัตราการดูดซับสูงๆ ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดและแบบขึ้นรูปเป็นแท่ง มีการใช้งานมากกว่าถ่านกัมมันต์ชนิดผงเนื่องจากสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

2.4 กระบวนการไฮโดรเทอร์มัล (Hydrothermal)

กระบวนการไฮโดรเทอร์มัล [28] เป็นกระบวนการแปรรูปทางเคมีที่ใช้ในการแปลงชีวมวลเป็นผลิตภัณฑ์ของแข็งหรือไฮโดรชาร์ เป็นกระบวนการเลียนแบบกระบวนการธรรมชาติของการก่อตัวของถ่านหิน สารตั้งต้นของชีวมวลหรือสารชีวมวล ถูกวางไว้ในเครื่องปฏิกรณ์แบบปิด เช่น หม้อน้ำความดัน ที่อุณหภูมิระหว่าง 180-250 องศาเซลเซียส ภายใต้แรงดันที่เกิดขึ้นเอง โดยใช้น้ำเป็นตัวทำปฏิกิริยา เพื่อสลายตัวสารคาร์โบไฮเดรต (Carbohydrates) เนื่องจากองค์ประกอบของชีวมวล จะมีความเสถียรน้อยลงเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะอิมมัลชันกับน้ำ การสังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล ที่ไม่รุนแรงโดยเวลาในการทำปฏิกิริยาสั้นๆ ไปจนถึงหลายชั่วโมง ซึ่งความรุนแรงของปฏิกิริยา มีผลมาจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และเวลาในการทำปฏิกิริยา จะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณคาร์บอนสูงขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในขั้นสุดท้าย คือกากของแข็งที่เรียกว่า คาร์บอนไฮโดรเทอร์มอล ในขณะที่เฟสของเหลวที่มีส่วนประกอบของสารเคมีที่สำคัญ เช่น เฟอร์ฟูรัล และกรดอินทรีย์ขนาดเล็ก

2.4.1 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล (Hydrothermal)

กลไกการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล (Hydrothermal) จะปฏิกิริยา 6 แบบ ประกอบด้วย ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน (Dehydration) ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ดีคาร์บอกซิเลชัน (Decarboxylation) และปฏิกิริยาอะโรมาไทเซชัน (Aromatization)

ก. ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) คือปฏิกิริยาของสารกับน้ำเป็นการให้โมเลกุลของน้ำ เข้าไปทำปฏิกิริยากับสารตัวอย่าง เช่น ชีวมวล โดยโมเลกุลของน้ำจะเข้าไปทำลายพันธะ (Break bond) ของลิกนิน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส ซึ่งเป็นส่วนประกอบในชีวมวลจากพันธะที่ต่อกันเป็นสายโซ่ยาว มีขนาดโมเลกุลขนาดใหญ่จะเกิดการแยกเป็นสายโซ่สั้นหรือโมเลกุลที่มีขนาดเล็ก

ข. ปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน (Dehydration)

ปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน (Dehydration) [29] คือเป็นการกำจัดโมเลกุลของน้ำออก ส่งผลให้มีปริมาณคาร์บอน (Carbon content) มากขึ้น หรืออีกในแง่หนึ่ง คือเป็นการกำจัดออกซิเจนในรูปของน้ำ

ค. ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization)

ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) คือเป็นการรวมตัวกันของโมเลกุลที่มีขนาดเล็กหรือพันธะสั้นๆ ซึ่งยังไม่เสถียรให้เป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ที่มีความเสถียรมากขึ้น

ง. ดีคาร์บอกซิเลชัน (Decarboxylation)

ดีคาร์บอกซิเลชัน (Decarboxylation) คือเป็นปฏิกิริยาทางเคมีที่จะกำจัดกลุ่มคาร์บอกซิลออกจากสารประกอบและปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยปกติ ดีคาร์บอกซิเลชัน หมายถึงปฏิกิริยาของกรดคาร์บอกซิลิก อะตอมของคาร์บอนออกจากสายโซ่คาร์บอน เป็นปฏิกิริยาเคมีย้อนกลับของครั้งแรกในการสังเคราะห์แสง เรียกว่า คาร์บอกซิเลชัน ซึ่งเป็นการเติมคาร์บอนไดออกไซด์ลงในสารประกอบ

จ. ปฏิกิริยาการควบแน่น (Dehydration reaction)

ปฏิกิริยาการควบแน่น (Dehydration reaction) คือปฏิกิริยาทางเคมีที่โมเลกุลสองตัว ซึ่งมีทำงานกลุ่มรวมกัน เพื่อสร้างโมเลกุลที่ใหญ่กว่า แต่โดยทั่วไปในปฏิกิริยาทางชีววิทยาเป็นน้ำ การควบแน่นที่เกิดจากการผลิตน้ำเป็นผลพลอยได้

ฉ. ปฏิกิริยาอะโรมาไทเซชัน (Aromatization)

ปฏิกิริยาอะโรมาไทเซชัน (Aromatization) คือเป็นการเปลี่ยนสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโซ่ตรงหรือการเปลี่ยนไฮโดรคาร์บอนแบบวง เป็นสารประกอบอะโรมาติกโดยใช้ความร้อนและตัวเร่งปฏิกิริยา

2.4.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล

ก. อุณหภูมิ

อุณหภูมิ เป็นปัจจัยหลักสำหรับกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล บทบาทเบื้องต้นของอุณหภูมิ คือการให้ความร้อนทำให้ประสิทธิภาพของการแปลงชีวมวลเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีพลังงานในการทำลายพันธะของชีวมวล ผลิตภัณฑ์หลักของกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล คือ แก๊ส ของเหลว และของแข็ง โดยปกติอุณหภูมิปานกลางจะให้ผลตอบแทนน้ำมัน ในขณะที่อุณหภูมิที่สูงจะสร้างก๊าซ และผลิตภัณฑ์ถ่าน นอกจากนี้ อุณหภูมิยังส่งผลทางอ้อมต่อกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล เนื่องจากทำให้น้ำมีความหนืดลดลง ซึ่งช่วยให้โมเลกุลของน้ำแพร่เข้าไปทำลายโครงสร้างชีวมวล ส่งผลให้ชีวมวลมีการสลายตัวเพิ่มขึ้น โดยอิทธิพลของความดันต่อปฏิกิริยามีความสำคัญน้อยเมื่อเทียบกับอุณหภูมิ

ข. เวลา

เวลา ในการทำปฏิกิริยามีบทบาทสำคัญในการกำหนดขอบเขต การทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มัล เป็นปฏิกิริยาช้า โดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลจะใช้เวลาแตกต่างกัน ในช่วงหลายนาที่ถึง 2-3 วัน ซึ่ง เวลาในการทำปฏิกิริยา จะมีผลต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเฉพาะช่วงเวลาหนึ่งเท่านั้น ถ้าเกินกว่านี้จะไม่ มีผลกระทบใดๆ ต่อกระบวนการ โดยทั่วไปปริมาณผลิตภัณฑ์ของแข็งจะมากขึ้น ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา เวลาที่เกิดปฏิกิริยายาวนานขึ้น โดยระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาจะเป็นตัวกำหนด องค์ประกอบของ ผลิตภัณฑ์โดยรวม ภายใต้สภาวะเหนือวิกฤต การไฮโดรไลซิสและอัตราการย่อยสลายของชีวมวลจะ ค่อนข้างเร็ว ดังนั้นเวลาในการทำปฏิกิริยาจะสั้น และการใช้เวลาสั้นๆ ในการทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มัลจะ ได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งที่มีค่าความร้อนสูง เนื่องจากกำจัดออกซิเจนที่มีอยู่ในชีวมวลถูกกำจัด ออกไปหรือเป็นการไฮโดรไลซิสเอมิเซลลูโลส ดังนั้นเวลาในการทำปฏิกิริยาที่สูงขึ้นจะเพิ่มการก่อตัวของ รุพุน ปริมาณรุพุนและพื้นที่ผิวสูง

ค. ชนิดของชีวมวล

ชนิดของชีวมวลโครงสร้างและองค์ประกอบของชีวมวลมีความแตกต่างกัน เนื่องจากมีความ แตกต่างของสภาพแวดล้อมในการเจริญเติบโต และเวลาในการเจริญเติบโต ซึ่งส่วนประกอบหลักของ ชีวมวล ได้แก่ เซลลูโลส เอมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยทั่วไปชีวมวลที่มีองค์ประกอบ เซลลูโลส และเอมิ เซลลูโลสสูงจะก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมันมากและชีวมวลที่มีองค์ประกอบลิกนินสูง จะให้ผลผลิต ไฮโดรคาร์บอนมาก เนื่องจากลิกนินสามารถย่อยสลายได้ยากและมีโครงสร้างที่ซับซ้อน ส่งผลให้ยังคงเหลืออยู่ ในโครงสร้างชีวมวล ภายใต้เงื่อนไขกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลของเซลลูโลส จะถูกไฮโดรไลซิส ที่อุณหภูมิ สูงกว่า 200 องศาเซลเซียส เอมิเซลลูโลส ที่ประมาณ 180 องศาเซลเซียส และลิกนินจะสลายตัวที่ ประมาณ 200 องศาเซลเซียส ดังนั้นส่วนประกอบของลิกนินและเซลลูโลส ในชีวมวลมีบทบาทสำคัญที่จะ ทำให้เกิดความพรุนของไฮโดรคาร์บอน

ง. ความดัน

ความดัน เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อการย่อยสลายชีวมวลในกระบวนการไฮโดรไลซิส การ ย่อยสลายชีวมวลและอัตราการไฮโดรไลซิส สามารถควบคุมได้โดยการรักษาความดัน โดยความดันมีผลต่อ ความหนาแน่นของตัวทำละลาย ถ้าตัวทำละลายที่มีความหนาแน่นสูงการสลายตัวของชีวมวลจะมากขึ้น เนื่องจากตัวทำละลายสามารถแทรกซึมเข้าไปในชิ้นส่วนชีวมวลได้ทั่วถึง อย่างไรก็ตามใน สภาวะเหนือ วิกฤตความดันจะมีอิทธิพลน้อยมากต่อผลิตภัณฑ์น้ำมันหรือแก๊ส เนื่องจากความดันจะไม่มีผลกระทบต่อ ความหนาแน่นของน้ำหรือตัวทำละลาย ความดันในถังปฏิกรณ์สามารถเพิ่มได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิ

โดยตรงหรือโดยการเติมของเหลว เช่น ไนโตรเจน ซึ่งความดันที่เกิดขึ้นมีผลต่อการเกิดไฮโดรคาร์บอน เนื่องจากความดันสูงทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้การทำลายองค์ประกอบของชีวมวลเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพสูง ดังนั้นผลกระทบของความดันที่เพิ่มขึ้นทำให้การก่อตัวของไฮโดรคาร์บอนมากขึ้น

จ. ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยามีความสำคัญต่อการก่อตัวของไฮโดรคาร์บอน การใช้สารลดแรงตึงผิวหรือตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณน้อยจะช่วยเพิ่มปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส โดยการกระจายตัวของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาในสารชีวมวล จะช่วยในการสลายสารประกอบลิกนินและเซลลูโลส เพื่อสร้างไฮโดรคาร์บอนได้มากขึ้นระหว่างกระบวนการของไฮโดรเทอร์มัล ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีผลต่อปฏิกิริยา โดยทั่วไปตัวเร่งปฏิกิริยากรดมีประสิทธิภาพมากที่สุดสำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาเบสจะขัดขวางการก่อตัวของไฮโดรคาร์บอนและเพิ่มการสะสมของน้ำมันเหลว การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยายังทำให้เกิดการรีดิวซ์ NO_x เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถเปลี่ยน NO_x เป็นไนโตรเจนและน้ำได้อย่างรวดเร็ว สำหรับการเลือกตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีที่ควรจะมีเสถียรทางความร้อน มีประสิทธิภาพ ราคาคุ้มค่า และมีความสามารถในการเลือกสูงสามารถแปลงชีวมวลเป็นผลผลิตได้มาก ตัวอย่าง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) โพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3) โพรพานอล ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$) เอทานอล ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$) และกรดซิตริก ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$)

2.5 กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization)

กระบวนการคาร์บอนไนเซชันเป็นกระบวนการทางไพโรไลซิส (Pyrolysis) ทำโดยการเผาวัตถุดิบในที่อับอากาศในอุณหภูมิต่ำกว่า 1000 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ 3 ประเภท ได้แก่ ถ่านที่มีลักษณะสีดำ เรียกว่า ชาร์ (Char) ของเหลว เรียกว่า ทาร์ (Tar) และแก๊ส ขั้นตอนการทำปฏิกิริยาคาร์บอนไนเซชัน เป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญมากที่สุด เนื่องจากในการทำปฏิกิริยาคาร์บอนไนเซชัน จะมีการเริ่มสร้างของโครงสร้างรูพรุน โดยในระหว่างการทำปฏิกิริยาธาตุและองค์ประกอบต่างๆ ที่ไม่ใช่คาร์บอนรวมถึงสารระเหยต่างๆ จะถูกกำจัดออกจากโครงสร้างของวัตถุดิบในรูปของแก๊สและทาร์ จากนั้นจะได้ชาร์ที่มีการจัดตัวของโครงสร้างผลึกที่ไม่เป็นระเบียบ ซึ่งจะมีช่องว่างรูพรุนระหว่างผลึกของคาร์บอน

2.5.1 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน

ก. อุณหภูมิ

อุณหภูมิจะมีผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์มากที่สุด คือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ปริมาณการเกิดชาร์จะลดลง ส่วนน้ำมันทาร์ และแก๊สที่ได้เพิ่มมากขึ้น และคุณสมบัติของน้ำมันทาร์จะมีกลุ่มโครงสร้างเปลี่ยนแปลงไปด้วย เพราะการเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มพลังงานเพื่อทำลายพันธะภายในโครงสร้างของวัตถุดิบนั้น

ข. ความดัน

ความดันการทำปฏิกิริยาโดยใช้ความดันสูงเนื่องจากทำให้ไอระเหยของแก๊สมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราปฏิกิริยาการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น

ค. อัตราความร้อน

อัตราความร้อนจะมีผลต่อคุณสมบัติ ปริมาณของทาร์ และสารระเหย การเพิ่มอัตราการให้ความร้อนอย่างรวดเร็ว จะมีผลทำให้ปริมาณสารระเหยถูกปลดปล่อยอย่างรวดเร็ว ทำให้คาร์บอนที่ได้มีรูพรุนขนาดใหญ่ ความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงกว่าคาร์บอนที่ได้จากการให้ความร้อนด้วยอัตราที่ต่ำกว่า เนื่องจากคาร์บอนที่ได้จากการทำปฏิกิริยาคาร์บอนไนเซชันด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิสูง คาร์บอนจะเรียงตัวเป็นระเบียบน้อยกว่า ทำให้เกิดช่องว่างเป็นรูพรุนขนาดใหญ่เมื่อทำการกระตุ้น สารกระตุ้นจะเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่าย

ง. ธรรมชาติของวัตถุดิบ

ธรรมชาติของวัตถุดิบแต่ละชนิดจะมีภาวะที่เหมาะสมแตกต่างกัน ในการทำปฏิกิริยาคาร์บอนไนเซชัน โดยวัตถุดิบที่แตกต่างกันอาจมีวิธีการกระตุ้นที่แตกต่างกัน เพื่อให้ได้คาร์บอนที่มีคุณภาพดีที่สุด ซึ่งเหมาะแก่การนำไปใช้งานในระบบที่เหมาะสมต่อไป

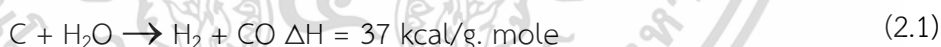
2.6 การผลิตถ่านกัมมันต์

การกระตุ้นเป็นกระบวนการที่เปลี่ยนวัตถุดิบไปเป็นถ่านกัมมันต์ ในสภาพที่มีปริมาณออกซิเจนจำกัด ซึ่งเป็นขั้นตอนการเพิ่มคุณภาพและประสิทธิภาพการดูดซับ ให้กับถ่านกัมมันต์จะมีทั้งกระบวนการที่เปลี่ยนวัตถุดิบไปเป็นถ่านกัมมันต์โดยตรง และกระบวนการที่เปลี่ยนวัตถุดิบไปเป็นถ่านชาร์ จากนั้นจึง

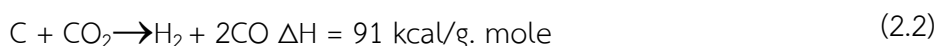
เปลี่ยนถ่านชาร์ไปเป็นถ่านกัมมันต์ โดยทั่วไปการกระตุ้นทำได้ 2 วิธี คือ การกระตุ้นทางกายภาพ และการกระตุ้นทางเคมี ดังนี้

2.6.1 การกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation)

วิธีกระตุ้นทางกายภาพเป็นการทำให้พื้นผิวของคาร์บอน เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น ให้มีรูพรุนขนาดต่างๆ ให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้น และคาร์บอนมีการจัดเรียงโครงสร้างใหม่ ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการดูดซับให้สูงขึ้น โดยทั่วไปสารที่ใช้ในการกระตุ้นทางกายภาพ ได้แก่ ไออน้ำ แก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ อากาศ ออกซิเจน และแก๊สไอเสียจากการเผา ซึ่งเรียกสารดังกล่าวว่า แก๊สออกซิไดซ์ (Oxidizing gas) โดยใช้ร่วมกับการให้ความร้อน ที่อุณหภูมิ 800-1000 องศาเซลเซียส ขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบ แก๊สพวกนี้จะไปทำปฏิกิริยากับคาร์บอนที่เหลืออยู่ และคาร์บอนอะตอมเกิดการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) ทำให้คาร์บอนอะตอมหลุดออกไป ส่งผลให้เกิดรูพรุนด้วยกลไกที่ต่างๆ กันคือ การเปิดรูพรุนที่ปิด การทำให้รูพรุนขนาดเล็กใหญ่ขึ้น และการสร้างรูพรุนใหม่ ทำให้คาร์บอนมีรูพรุนและมีพื้นที่ผิวที่มีอิเล็กตรอนอิสระมากขึ้น จึงส่งผลให้มีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ข้อดีของการกระตุ้นวิธีนี้คือ ไม่มีสารเคมีตกค้างอยู่ในผลิตภัณฑ์ที่ได้ แต่มีข้อเสีย คือ ต้องใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นสูง ตัวแปรที่มีผลต่อการกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิไดซ์ ได้แก่ ชนิดและปริมาณขององค์ประกอบที่มีอยู่ในวัตถุดิบ ชนิดของแก๊สออกซิไดซ์ อัตราส่วนของแก๊สที่ใช้ อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น ตัวอย่างการกระตุ้นโดยวิธีทางกายภาพ คือ การกระตุ้นด้วยไออน้ำ โดยการใช้ไออน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์คาร์บอน จัดว่าเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ดังนั้นจึงต้องทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิสูง ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการที่ 2.1



อัตราการออกซิไดซ์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่ไม่ควรให้อุณหภูมิสูงเกิน 1,000 องศาเซลเซียส เนื่องจากปฏิกิริยาจะกลายเป็น Diffusion controlled rate ซึ่งอะตอมของคาร์บอนที่อยู่ชั้นนอกจำนวนมาก จะถูกเผาไหม้ให้มีขนาดและความพรุนของอนุภาคเล็กลง การกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ โดยการให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวออกซิไดซ์คาร์บอน จัดว่าเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนเช่นกัน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังสมการที่ 2.2



จากค่า ΔH จะเห็นได้ว่าปฏิกิริยานี้ต้องการพลังงานความร้อนมากกว่าวิธีการกระตุ้นด้วยด้วยไอน้ำ ดังนั้นจึงใช้อุณหภูมิกระตุ้นสูงกว่าการกระตุ้นด้วยไอน้ำโดยทั่วไป มักจะใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นประมาณ 850-1,100 องศาเซลเซียส ทั้งนี้อุณหภูมิที่ใช้จะขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้ด้วย แต่ในทางปฏิบัติแล้วจะใช้แก๊สเชื้อเพลิงเผาไหม้ ซึ่งจะให้ทั้งไอน้ำและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ อาจมีแก๊สออกซิเจนส่วนเกินบ้างเล็กน้อยหรืออาจจะมีการเติมไอน้ำเข้าไปด้วยเพื่อเป็นการกระตุ้น โดยใช้ทั้งสองวิธีร่วมกัน การกระตุ้นด้วยอากาศ โดยการใช้ออกซิเจนในอากาศเป็นตัวออกซิไดซ์คาร์บอน เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ จัดเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการ 2.3 และ 2.4



การใช้อากาศเพื่อทำการกระตุ้นมีการใช้กันน้อยมาก ทั้งนี้เพราะว่าการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในสภาวะที่ต้องการทำได้ยากกว่า อีกทั้งแก๊สออกซิเจนอาจจะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ผิวของถ่านทำให้เกิดความเสียหายได้ด้วย

2.6.2 การกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation)

การกระตุ้นทางเคมีเป็นการทำปฏิกิริยาคาร์บอนในเซชัน วัตถุดิบที่ผสมกับสารเคมีที่ใช้เป็นสารกระตุ้นที่อุณหภูมิ 500 - 900 องศาเซลเซียส ขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ สารเคมีที่ใช้เป็นสารกระตุ้นโดยทั่วไป เป็นสารประเภทแอลคาไลน์ โลหะแอลคาไลน์ สารประกอบคาร์บอเนต สารประเภทเบสและกรดบางชนิด เช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) และกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เป็นต้น สารเคมีที่เติมลงไปจะช่วยให้ทำลายโครงสร้างของวัตถุดิบและขณะที่ทำปฏิกิริยาคาร์บอนในเซชันจะเกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์ในวัตถุดิบและเกิดการเชื่อมโยงกัน (Cross-link) ของโครงสร้าง ทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดรูพรุนขึ้น สารระเหยบางตัวในโครงสร้างของวัตถุดิบไม่สามารถหลุดออกไปได้ เนื่องจากเกิดการเชื่อมโยงกันทำให้ปริมาณคาร์บอนที่ได้เพิ่มขึ้นและการเกิดทาร์ลดลง การเชื่อมโยงกันประกอบกับสารเคมีที่ใช้มีความคงทนต่อการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงๆ จึงยังคงสภาพหุ้มอยู่รอบๆ และแทรกตัวอยู่ภายใน ทำให้เกิดการหดตัวน้อย เมื่อนำคาร์บอนที่ได้มาล้างสารเคมีออกด้วยน้ำหรือกรดจะเกิดช่องว่างหรือรูพรุนเพิ่มขึ้นอีก ข้อดีของวิธีนี้คือ ใช้อุณหภูมิไม่สูงมากนัก แต่มีข้อเสียคือมีสารตกค้างในผลิตภัณฑ์ทำให้ต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมี รวมทั้งเครื่องมือที่ใช้ต้องเป็นชนิดพิเศษที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้เพราะสารเคมี

บางชนิดเป็นสารกัดกร่อน ตัวแปรที่มีผลต่อการกระตุ้นด้วยวิธีทางเคมี ได้แก่ ชนิดและปริมาณขององค์ประกอบที่มีอยู่ในวัตถุดิบ ชนิดของสารเคมี อัตราส่วนของสารเคมีต่อวัตถุดิบ อุณหภูมิ และเวลา

2.7 กระบวนการดูดซับ

2.7.1 ประเภทของการดูดซับ

การดูดซับเป็นกระบวนการที่โมเลกุลสารถูกดูดซับ (Adsorbate) ในสถานะแก๊สหรือของเหลวถูกดึงให้มาเกาะจับและติดที่บริเวณผิวของของแข็งที่ทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับ (Adsorbent) การดูดซับนี้นับเป็นกระบวนการแยกองค์ประกอบของสารออกจากสารละลายหรือแก๊สอีกวิธีหนึ่ง ความสามารถในการดูดซับสารที่ต่างกัน ขึ้นกับลักษณะและความมีขี้ของผิว โดยแบ่งตัวดูดซับตามลักษณะขี้ของผิวได้ 2 ชนิด คือ ชนิดที่มีขี้ ได้แก่ ซีโอไลต์ ซิลิกาเจล และอะลูมินาออกไซด์ เป็นต้น และชนิดที่ไม่มีขี้ ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ และพอลิเมอร์ดูดซับ เป็นต้น ดังนั้นในการที่จะแยกสารองค์ประกอบใดๆ จึงควรเลือกใช้ตัวดูดซับให้เหมาะสมกับสารนั้นๆ การพิจารณาแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับจะทำให้ทราบถึงชนิดของการดูดซับได้ เนื่องจากสารองค์ประกอบแต่ละชนิดในสารละลายหรือแก๊สมีแรงดึงดูดกับตัวดูดซับได้ไม่เท่ากันและมีความสามารถในการกระจายบนผิวที่ต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะ โครงสร้าง สมบัติทางเคมีที่ผิวของตัวดูดซับ และสารที่เป็นตัวถูกดูดซับ โดยการดูดซับสามารถแบ่งตามความแตกต่างของแรงดึงดูดที่เกิดขึ้นในการดูดซับได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

ก. การดูดซับทางกายภาพ

การดูดซับทางกายภาพเป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals Forces) ซึ่งเกิดจากการรวมแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force) การดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนทำให้การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อย คือ ต่ำกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล และสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดีเพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่ายด้วย สารที่ถูกดูดซับสามารถเกาะอยู่รอบๆ ผิวของสารดูดซับได้หลายชั้น (Multilayer) หรือในแต่ละชั้นของโมเลกุลสารถูกดูดซับ จะติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับในชั้นก่อนหน้านั้น โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับและจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย

ข. การดูดซับทางเคมี

การดูดซับทางเคมีเกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวถูกดูดซับเดิม มีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แล้วมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ขึ้น โดยมีพันธะเคมีซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงประมาณ 50-400 กิโลจูลต่อโมล การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับจะทำได้ยาก ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (Irreversible) และการดูดซับประเภทนี้จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) เท่านั้น ซึ่งการดูดซับทางกายภาพและทางเคมีมีข้อแตกต่างกันหลายอย่าง

2.8 รูปแบบของไอโซเทอมการดูดซับ 6 รูปแบบ

การดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ คือ ความดันหรือความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ อุณหภูมิ ชนิดของสารถูกดูดซับ และสารดูดซับ โดยทั่วไปจะควบคุมให้อุณหภูมิของการดูดซับให้คงที่และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับกับความดันหรือความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุลของการดูดซับ โดยเส้นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าว เรียกว่า ไอโซเทอม (Isotherm) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 [30] ซึ่งเป็นการจำแนกไอโซเทอมการดูดซับแก๊สตามระบบ IUPAC โดยไอโซเทอม 5 ชนิดแรก (Type I Isotherm ถึง Type V Isotherm) ได้ถูกจำแนกไว้ตั้งแต่ ปี ค.ศ. 1940 โดยนักวิทยาศาสตร์ 4 ท่าน ได้แก่ S. Brunauer L.S. Deming W.S. Diming และ E. Teller หรืออาจเรียกการจำแนกไอโซเทอม 5 ชนิด แรกว่าเป็นการจำแนกตามแบบของ BDDT

ก. Type I Isotherm

Type I Isotherm เป็นไอโซเทอมสำหรับการดูดซับที่เป็นแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) หรือแบบแลงเมียร์ (Langmuir) เป็นปรากฏการณ์การดูดซับของสารที่ไม่มีความพรุนหรือมีรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก เช่น ถ่านกัมมันต์ และซีโอไลต์ พบทั้งในการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ ซึ่งปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความดันสัมพัทธ์ (Relative pressure) ต่ำๆ และที่ความดันสัมพัทธ์สูง เข้าใกล้ 1 จะมีการดูดซับเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย

ข. Type II Isotherm

Type II Isotherm ไอโซเทอมรูปตัวเอส (S-shaped isotherm) มักจะเกิดกับวัสดุที่ไม่มีความพรุนหรือมีความพรุนขนาดใหญ่ (Macro-porous) ที่จุดเปลี่ยนกราฟ (Inflection point or knee of isotherm) เป็นตำแหน่งที่ผิวหน้าถูกคลุมแบบชั้นเดียวเกือบสมบูรณ์แล้ว เมื่อเพิ่มความดันจะทำให้การดูดซับเกิดขึ้นมากกว่าหนึ่งชั้น ดังนั้นการดูดซับแบบนี้จึงเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer adsorption)

ค. Type III Isotherm

Type III Isotherm เป็นไอโซเทอมที่ไม่มีจุดเปลี่ยนกราฟ มีรูปร่างคล้ายกระจกเงา ไอโซเทอมแบบนี้ไม่ค่อยพบ จะเกิดกับการดูดซับที่ไม่แข็งแรงเป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นกับของแข็งที่ไม่มีรูพรุน (Nonporous solid) และของแข็งที่มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ แต่เป็นพวกที่มีแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับ และตัวถูกดูดซับที่ไม่แข็งแรงทำให้ดูดซับได้น้อย เกิดการดูดซับแบบขั้นเดียวที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำ แต่เมื่อเกิดการดูดซับแบบหลายขั้น จะเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยตัวเอง ทำให้ดูดซับได้มากขึ้น ที่ความดันสัมพัทธ์ที่มีค่าสูง

ง. Type IV Isotherm

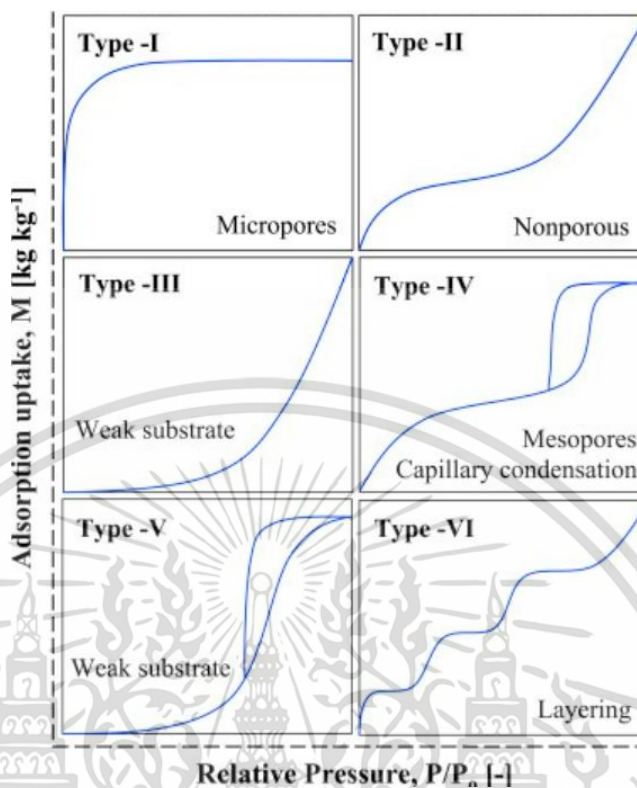
Type IV Isotherm เป็นไอโซเทอมที่พบบ่อยมากในวัสดุที่มีรูพรุนส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดกลาง ขนาดรูพรุนระหว่าง 2-50 นาโนเมตร ในช่วงแรกซึ่งมีความดันสัมพัทธ์ต่ำ เส้นไอโซเทอมจะเหมือนกับ ไอโซเทอมแบบที่ 2 จากนั้นการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความดันสัมพัทธ์สูงขึ้น เนื่องจากเกิดการควบแน่นคาпилลารี (Capillary condensation) ขึ้นในรูพรุน ซึ่งทำให้เกิด Hysteresis loop ในช่วง Desorption ซึ่งข้อมูลของการเกิดการควบแน่นในช่วงคาпилลารี สามารถนำมาคำนวณหาการกระจายขนาดของรูพรุน (Pore size distribution) ในของแข็งที่มีรูพรุนขนาดกลางได้ การควบแน่นคาпилลารีทำให้ช่วง Desorption มีปริมาณดูดซับที่สูงกว่าการเกิดการดูดซับที่ความดันเท่ากัน

จ. Type V Isotherm

Type V Isotherm เหมือนไอโซเทอมชนิดแบบที่ 4 ต่างกันเพียงเกิดการควบแน่นในรูพรุนมี Hysteresis loop ไอโซเทอมแบบนี้จะพบไม่บ่อยนัก

ฉ. Type VI Isotherm

Type VI Isotherm เป็นไอโซเทอมแบบขั้นบันได (Stepped isotherm) ไอโซเทอมแบบนี้จะพบไม่บ่อย โดยมากพบในระบบที่เป็นการดูดซับแบบขั้นต่อขั้น บนพื้นที่ผิวที่ค่อนข้างคล้ายกัน (Uniform) โดยรูปร่างของไอโซเทอมจะขึ้นอยู่กับระบบและอุณหภูมิในการดูดซับ



รูปที่ 2.6 ไอโซเทอมการดูดซับ

2.9 การจำแนกขนาดรูพรุนตามมาตรฐาน IUPAC

การจำแนกขนาดรูพรุนตามมาตรฐาน IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) [31] สามารถจำแนกรูพรุนได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ ไมโครพอร์ (Micropore) มีโซพอร์ (Mesopore) และแมโครพอร์ (Macropore)

ก. ไมโครพอร์ (Micropore)

รูพรุนประเภทที่ 1 คือ ไมโครพอร์ (Micropore) เป็นรูพรุนที่มีขนาดความกว้างไม่เกิน 2 นาโนเมตร โครงสร้างรูพรุนแบบไมโครพอร์ มีอยู่จำนวนมากจะส่งผลให้วัสดุดังกล่าวมีขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก หมายถึงพื้นที่ผิวของวัสดุที่โมเลกุลใดๆ สามารถเข้าถึงได้ต่อหน่วยน้ำหนักของวัสดุนั้น และเนื่องจากความกว้างของรูพรุนแบบไมโครพอร์มีขนาดที่ใหญ่กว่า ขนาดของโมเลกุลทั่วไปไม่มากนักผลที่ตามมาคือ เมื่อมีโมเลกุลใดๆ เคลื่อนที่เข้ามาอยู่ในรูพรุนแล้วโมเลกุลเหล่านั้นจะตกอยู่ภายใต้อิทธิพลของแรงอันตรกิริยาจากผนังของรูพรุน เรียกแรงอันตรกิริยานี้ว่า แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals interaction) ทำให้โครงสร้างรูพรุนแบบไมโครพอร์สามารถกักเก็บโมเลกุลบางชนิดเอาไว้ได้ ซึ่งเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประโยชน์อย่างยิ่ง เมื่อนำวัสดุที่มีรูพรุนแบบไมโครพอร์ ไปประยุกต์ในเทคโนโลยีการดูดซับ (Adsorption) หรือวัสดุสำหรับตรึงรูปตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี ในงานวิจัยด้านวัสดุที่มีรูพรุนในอดีต นักวิจัยมักจะมุ่งเน้นความสำคัญไปที่การสังเคราะห์รูพรุนขนาดไมโครพอร์เป็นหลัก เนื่องด้วยต้องการเพิ่มขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุ เท่านั้นตัวอย่างของตัวดูดซับที่มีขนาดของรูเป็นไมโครพอร์ เช่น ซีโอไลต์ (Zeolite)

ข. มีโซพอร์ (Mesopore)

รูพรุนประเภทที่ 2 ซึ่งมีขนาดรูพรุนที่กว้างกว่า คือ มีขนาดความกว้างในช่วง 2 ถึง 50 นาโนเมตร เรียกว่า มีโซพอร์ (Mesopore) โดยเฉพาะอย่างยิ่งรูพรุนแบบมีโซพอร์ขนาดเล็ก จะมีประโยชน์คล้ายกับรูพรุนแบบไมโครพอร์ในด้านความสามารถในการกักเก็บโมเลกุลโดยเฉพาะอย่างยิ่งโมเลกุลขนาดใหญ่ จำพวกสารชีวโมเลกุลเช่นเอนไซม์หรือดีเอ็นเอ เป็นต้น เนื่องจากสารชีวโมเลกุลโดยมากมีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่ในระดับนาโนเมตร จึงทำให้แรงแวนเดอร์วาลส์จากผนังของมีโซพอร์ ยังคงมีอิทธิพลต่อโมเลกุลขนาดใหญ่เหล่านี้ผลที่ตามมาทำให้โครงสร้างรูพรุนแบบมีโซพอร์ขนาดเล็กยังคงมีศักยภาพในการกักเก็บสารชีวโมเลกุลเหล่านี้ได้เป็นอย่างดี ด้วยลักษณะดังกล่าวจึงทำให้โครงสร้างรูพรุนแบบมีโซพอร์นั้นมักถูกนิยมนำมาใช้เป็นวัสดุสำหรับการตรึงรูปเอนไซม์สำหรับรูพรุนแบบมีโซพอร์ขนาดใหญ่ ขนาดความกว้างตั้งแต่ 10 นาโนเมตร ตัวอย่างสารดูดซับที่มีขนาดของรูเป็นมีโซพอร์ ได้แก่ ซิลิกาเจล (Silica gel) อลูมินาเจล (Alumina gels) และอะมิโนซิลิเกตคะตะลิสต์ (Aminosilicate catalyst)

ค. แมคโครพอร์ (Macropore)

รูพรุนประเภทที่ 3 คือ แมคโครพอร์ (Macropore) หมายถึง รูพรุนที่มีขนาดความกว้าง ตั้งแต่ 50 นาโนเมตรขึ้นไป โครงสร้างรูพรุนขนาดใหญ่เหล่านี้ไม่ได้รับความสนใจมาก เนื่องจากไม่ได้มีส่วนช่วยโดยตรงต่อการเพิ่มขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุรูพรุนรวมถึงการมีขนาดความกว้างของรูพรุนที่ใหญ่กว่าโมเลกุลทั่วไปมาก จึงทำให้แรงแวนเดอร์วาลส์ไม่มีอิทธิพลภายในรูพรุนเหล่านี้ อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันนักวิจัยด้านวัสดุที่มีรูพรุนได้มุ่งความสำคัญไปยังการมีอยู่ของโครงสร้างรูพรุนขนาดใหญ่เหล่านี้ในวัสดุ เนื่องจากโครงสร้างรูพรุนดังกล่าวมีประโยชน์เป็นอย่างมากในด้านการเป็นช่องทาง ลำเลียงขนาดใหญ่ สำหรับการเคลื่อนที่ของโมเลกุลต่างๆ ไปยังรูพรุนแบบไมโครพอร์ที่มีขนาดเล็กกว่าได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น เนื่องจากช่วยลดความต้านทานที่เกิดจากการแพร่ผ่านรูพรุนของโมเลกุลของของไหลที่เคลื่อนที่เข้ามาได้

2.10 แบบจำลองสมดุลการดูดซับ

กระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นต่อเนื่องโดยสารที่ถูกดูดซับและมีการคลายการดูดซับ ไปพร้อมกัน ซึ่งสมดุลจะเกิดขึ้นเมื่ออัตราการดูดซับและการคายการดูดซับเท่ากัน ที่จุดนี้ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูด

ซับในสถานะต่างๆ เช่น ในน้ำเท่ากับความเข้มข้นในสารดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ หนึ่งๆ ซึ่งใช้ไอโซเทอมการดูดซับเป็นตัวแทนในการอธิบายสมดุลที่เกิดขึ้น [32-35] แสดงดังสมการ 2.5

$$q_e = \frac{(C_i - C_e)}{W} \times V \quad (2.5)$$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณตัวดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับที่สมดุลหลังการดูดซับ (mg/g)

C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายก่อนการดูดซับ (mg/L)

C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายหลังการดูดซับ (mg/L)

V คือ ปริมาตรของสารละลาย (L)

W คือ น้ำหนักของของตัวดูดซับ (g)

สมดุลการดูดซับเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นหรือความดันของสารที่ถูกดูดซับที่สมดุลกับปริมาณสมดุลดูดซับเฉพาะสำหรับที่อุณหภูมิ หนึ่งๆ ซึ่งแบบจำลองสมดุลดูดซับที่นิยมใช้ในการอธิบาย ได้แก่ แบบจำลองสมดุลดูดซับ Langmuir Freundlich Temkin และ Jovanovic ของซึ่งรายละเอียดของแบบจำลองแต่ละชนิดดังนี้

ก. Langmuir Isotherm

แบบจำลองสมดุลดูดซับแบบ Langmuir มีสมมติฐานของการดูดซับ คือ การดูดซับเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว สมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของ Langmuir [5] แสดงดังสมการ 2.6

$$q_e = \frac{q_m k_L C_e}{1 + k_L C_e} \quad (2.6)$$

โดยที่ q_m คือ ปริมาณสมดุลดูดซับจำเพาะสูงสุดซึ่งใช้การบอกขีจำกัดของการดูดซับแบบชั้นเดียว

k_L คือ ค่าคงที่แบบจำลองสมดุลดูดซับแบบ Langmuir

ข. Freundlich Isotherm

แบบจำลอง Freundlich มีค่าสมดุลดูดซับจำเพาะ (q_e) แปรผันตามความเข้มข้นของสารละลาย

ที่ถูกดูดซับที่สมดุลยกกำลังค่าคงที่ (C_e^n) [36] แสดงดังสมการ 2.7

$$q_e = k_F C_e^n \quad (2.7)$$

โดยที่ K_F และ n คือ ค่าคงที่ของแบบจำลองสมดุลงดูดซับของ Freundlich

ค. Temkin Isotherm

ไอโซเทอมการดูดซับของเทมคิน มีสมมติฐานว่าความร้อนของการดูดซับจะลดลงเป็นเส้นตรงเป็นฟังก์ชันลอการิทึม เมื่อปริมาณผิวหน้าของตัวดูดซับถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับ (Adsorbent-Adsorbate Interactions) โดยไอโซเทอมการดูดซับของเทมคิน สามารถนำไปใช้ได้กับการดูดซับทางเคมี เนื่องจากในสมการจะพิจารณาถึงพลังงานการกระตุ้นของตัวดูดซับ จากสมมติฐานข้างต้นทำให้เขียนสมการไอโซเทอมการดูดซับของเทมคิน [37] ดังแสดงสมการที่ (2.8) และ (2.9)

$$q_e = B \ln K_T + B \ln C_e \quad (2.8)$$

$$B = \frac{RT}{b} \quad (2.9)$$

โดยที่ K_T คือ ค่าคงที่การจับสมดุลงดูดซับของลอการิทึมความร้อนของเทมคิน ($L \cdot g^{-1}$)

b คือ เทมคินไอโซเทอมคงตัว

R คือ ค่าคงที่ของก๊าซสากล ($8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

T คือ อุณหภูมิที่ 298 K

B คือ ค่าคงที่ที่เกี่ยวข้องกับความร้อนของการดูดซับ

ง. Jovanovic Isotherm

แบบจำลอง Jovanovic ขึ้นอยู่กับสมมติฐานของแบบจำลอง Langmuir เช่นเดียวกับศักยภาพของการสัมผัสเชิงกลบางอย่างระหว่างตัวดูดซับและตัวดูดซับ ไอโซเทอร์ม Jovanovic [38] คำนวณแสดงดังสมการที่ 2.10

$$q_e = q_m (1 - \exp^{-k_j C_e}) \quad (2.10)$$

โดยที่ q_e คือ ปริมาณของตัวดูดซับในตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)

q_m คือ การดูดซับสูงสุดของตัวดูดซับ

k_j คือ ค่าคงที่ของ Jovanovic

2.11 แบบจำลองจลนพลศาสตร์

การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การดูดซับวิเคราะห์ในรูปแบบ Pseudo-First-Order Pseudo-Second-Order Elovich และ Inter-Particle Diffusion ดังนี้

ก. Pseudo-First-Order

$$q_t = q_e (1 - \exp^{-k_1 t}) \quad (2.11)$$

โดยที่ q_e คือ ปริมาณการดูดซับสารดูดซับต่อมวลสารดูดซับที่สภาวะสมดุล ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)

q_t คือ ปริมาณการดูดซับสารดูดซับต่อมวลสารดูดซับ ณ เวลาใดๆ t ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)

k_1 คือ ค่าคงที่อัตราของสมการ PFO (min^{-1})

ข. Pseudo-Second-Order

$$q_t = \frac{q_e^2 k_2 t}{q_e k_2 t + 1} \quad (2.12)$$

โดยที่ q_e คือ ปริมาณตัวดูดซับที่ถูกดูดซับที่สมดุล ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)

q_t คือ ปริมาณตัวดูดซับที่ถูกดูดซับที่ ณ เวลาใดๆ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)

k_2 คือ สมการ PSO อัตราคงที่ ($\text{min}\cdot\text{mg}\cdot\text{mg}^{-1}$)

ค. Elovich

แบบจำลอง Elovich มีสมมติฐานว่า พื้นที่ผิวของแข็งหรือสารดูดซับต่างชนิดกันและพลังงานจากการดูดซับนั้นต่างกัน การดูดซับที่พื้นผิวของสารดูดซับมีการใช้งานหรือถูกใช้ไปในการดูดซับน้อยจะทำให้การคายซับและแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของสารดูดซับ ไม่ส่งผลต่อจลนศาสตร์ของการดูดซับนี้สมการของ Elovich [38] ดังแสดงสมการ 2.13

$$q_t = \frac{1}{\beta} \ln(1 + \alpha\beta t) \quad (2.13)$$

โดยที่ q_t คือ ปริมาณของพาราควอตที่ถูกดูดซับในหน่วย ณ เวลาใดเวลาหนึ่ง ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)

α คือ อัตราการดูดซับเริ่มต้นในหน่วย

β คือ ขอบเขตของการครอบคลุมพื้นผิวในและพลังงานกระตุ้นกระบวนการ

สมการนี้จำกัดการใช้งานเฉพาะช่วงเริ่มต้นของการดูดซับในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารที่ถูกดูดซับและสารดูดซับเท่านั้น โดยกระบวนการดูดซับนั้นยังไม่เข้าสู่สภาวะสมดุล นอกจากนี้พฤติกรรมการณ์

ดูดซับที่อธิบายโดยใช้แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสอง และสมการของ Elovich นี้สามารถใช้อธิบายการดูดซับได้ดีเมื่อสัดส่วนของพื้นผิวบนสารดูดซับถูกใช้งานได้ไม่เกินร้อยละ 70 ของพื้นผิวทั้งหมด

ง. Inter-Particle Diffusion

สำหรับจลนพลศาสตร์การดูดซับจะสอดคล้องกับสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับ นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับการแพร่ภายในรูพรุนอีกด้วย ดังนั้นสมการการแพร่ภายในรูพรุนเป็นอีกสมการหนึ่งที่น่ามาใช้ในการทำนายจลนพลศาสตร์การดูดซับ สมการการแพร่ภายในรูพรุนของ Weber และ Morris สามารถเขียนอยู่ในรูปสมการเชิงเส้นได้ [39] ดังแสดงสมการ 2.14

$$q_t = k_{diff} t^{\frac{1}{2}} + C \quad (2.14)$$

โดยที่ k_{diff} คือ ค่าคงที่อัตราการดูดซับของการแพร่ภายในรูพรุน ($mg^{-1} \cdot g^{-1} \cdot min^{-0.5}$)
 C คือ ผลกระทบที่เกิดจากความหนาของชั้นฟิล์ม ($mg \cdot g^{-1}$)

2.12 สารกำจัดศัตรูพืช (Pesticides)

สารกำจัดศัตรูพืช [13-17] หมายถึง สารเคมีที่มีการนำมาใช้โดยมีวัตถุประสงค์ เพื่อ ควบคุม ป้องกัน และกำจัดศัตรูของพืชชนิดต่างๆ เช่น แมลงต่างๆ รวมถึงสัตว์ฟันแทะทำให้ผลผลิตทางการเกษตรเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งยังช่วยป้องกันและกำจัดโรคที่เกิดจากสัตว์เป็นพาหะ ทั้งนี้ในทางกฎหมายสารกำจัดศัตรูพืชทุกชนิดจัดเป็นวัตถุอันตราย ตามพระราชบัญญัติวัตถุอันตราย พ.ศ.2535 จึงจำเป็นต้องมีมาตรการควบคุมเพื่อกำกวดการผลิต การนำเข้า และการส่งออก ซึ่งสารบางชนิดจำเป็นต้องมีการขออนุญาต เพื่อการมีไว้ในครอบครอง สำหรับการแบ่งกลุ่มของสารกำจัดศัตรูพืช หากใช้ชนิดของศัตรูพืชที่ต้องการจะกำจัดเป็นเกณฑ์จะสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่มหลัก ได้แก่

ก. สารเคมีที่ใช้เพื่อการกำจัดแมลง (Insecticides)

สารเคมีที่ใช้เพื่อการกำจัดแมลง (Insecticides) คือ สารเคมีสำหรับใช้ในการกำจัดแมลงและปรสิตภายนอกต่างๆ ที่มีการใช้ในทางสัตวแพทย์ในปัจจุบันมีด้วยกันหลายชนิด เช่น Organophosphates Pyrethroids และ Neonicotinoids

ข. สารเคมีที่ใช้เพื่อการกำจัดหนูและสัตว์ฟันแทะ (Rodenticides)

สารเคมีที่ใช้เพื่อการกำจัดหนูและสัตว์ฟันแทะ (Rodenticides) คือ สารเคมีที่ใช้เพื่อการกำจัดหนูและสัตว์ฟันแทะเป็นหนึ่งในศัตรูพืช ที่มักก่อให้เกิดความเสียหายทั้งต่อผลผลิตทางการเกษตร และภายในบ้านเรือน อีกทั้งยังเป็นพาหะในการนำโรค เช่น โรคเลปโตสไปโรซิส ซึ่งเป็นโรคติดต่อจากสัตว์มาสู่มนุษย์ ซึ่งสารที่ใช้ในการป้องกันและกำจัดสัตว์ฟันแทะนั้นมีด้วยกันหลายชนิด โดยในปัจจุบันสารเคมีที่มักนำมาใช้ในการกำจัดสัตว์ฟันแทะ ได้แก่ zinc phosphide สารต้านการแข็งตัวของเลือดกลุ่ม warfarin สารกลุ่มที่มีวิตามิน D3 เป็นส่วนประกอบ เป็นต้น ขณะเดียวกันก็มีสารบางชนิดที่ไม่มีการผลิตหรือมีการนำมาใช้ในครัวเรือนแล้ว อันเนื่องมาจากความเป็นพิษที่รุนแรง เช่น Thallium Yellow phosphorus รวมถึง Vacor (N-3-pyridylmethyl-N-p-nitrophenyl urea; PNU) ทั้งนี้สารกำจัดหนูทุกชนิดเป็นสารอันตราย

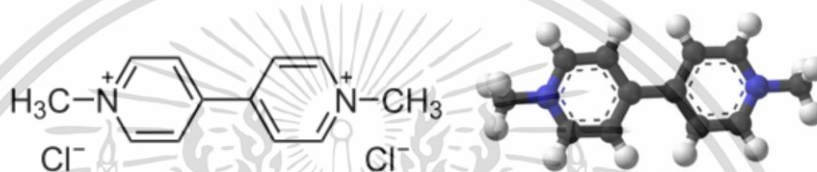
ค. สารเคมีที่ใช้เพื่อการกำจัดเชื้อรา (Fungicides)

สารเคมีที่ใช้เพื่อการกำจัดเชื้อรา (Fungicides) คือ การป้องกันและกำจัดเชื้อรามาใช้โดยมีวัตถุประสงค์ เพื่อการป้องกันและแก้ไขปัญหาการติดเชื้อราในพืชและผลผลิตจากพืช เช่น เมล็ดพืชชนิดต่างๆ ผลไม้หลายชนิดที่อยู่ในระหว่างการเก็บรักษาก่อนการนำออกขาย สำหรับความเป็นพิษของสารกำจัดเชื้อรากลุ่มใหม่ๆ จะมีความเป็นพิษในระดับต่ำ เมื่อเทียบกับสารกำจัดเชื้อราชนิดที่มีใช้กันมานานแล้ว ซึ่งสารเหล่านี้สัตว์อาจสัมผัสโดยตรงหรือโดยบังเอิญก็ได้ นอกจากนี้สิ่งที่ควรคำนึงถึงในการเลือกใช้สารป้องกันและกำจัดเชื้อราคือ ตัวทำลายที่ใช้ร่วมกับสารกำจัดเชื้อรา เนื่องจากพบว่าพิษที่เกิดขึ้นอาจเกี่ยวข้องกับตัวทำลายที่ใช้ยกตัวอย่างของตัวทำลาย เช่น Carbon disulfide Carbon tetrachloride Ethylene dibromide Formaldehyde และ Sulfur dioxide เป็นต้น

ง. สารเคมีที่ใช้เพื่อการกำจัดวัชพืช (Herbicides)

สารเคมีที่ใช้เพื่อการกำจัดวัชพืช (Herbicides) คือ สารป้องกันกำจัดวัชพืช สารเคมีกำจัดวัชพืช แบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ พวกที่มีพิษทำลายไม่เลือก และพวกที่มีพิษทำลายเฉพาะกลุ่มวัชพืช คือ ทาทำลายเฉพาะวัชพืชหญ้าใบกว้างหรือพืชใบแคบ สารกำจัดวัชพืชที่มีพิษทำลายไม่เลือก คือ พาราควอต (Paraquat) ส่วนที่มีพิษทำลายเฉพาะ คือ จำพวกแอทราซีน (Atrazine)

2.12.1 พาราควอต



รูปที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของพาราควอต

สูตร: $C_{12}H_{14}Cl_2N_2$

รหัส IUPAC: 1,1-Dimethyl-4,4'-bipyridinium dichloride

ปริมาตรเชิงโมล: 257.16 ก./โมล

ละลายใน: น้ำ

ความหนาแน่น: 1.25 ก./ลบ.ซม.

พาราควอต (Paraquat) เป็นสารเคมีกำจัดวัชพืช ออกฤทธิ์โดยการดูดซึมทางใบอย่างไม่จำเพาะชนิดของวัชพืช มีผลฆ่าทำลายเนื้อเยื่อพืชโดยรบกวนการสังเคราะห์แสงและเยื่อหุ้มเซลล์ ทำให้เกิดใบแห้งอย่างรวดเร็ว เกษตรกรไทยนิยมใช้กำจัดวัชพืชในไร่อ้อย มันสำปะหลัง ยางพารา เป็นต้น พาราควอตเป็นสารที่มีความเป็นพิษสูง ปริมาณที่ทำให้ผู้ใหญ่เสียชีวิตได้อยู่ที่ 4 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัม หากได้รับสารทางปาก ทำให้เกิดการแสบร้อน เกิดแผลในหลอดลมและระบบทางเดินอาหาร สามารถเข้าสู่ร่างกายผ่านการสัมผัส สูดดม ปนเปื้อนในอาหาร และยังสามารถก่อให้เกิดโรคต่างๆ เช่น ก่อโรคมะเร็ง กินสัน สมอเงี้ยว ที่สำคัญเป็นสารก่อมะเร็ง นอกจากนี้จะเป็นอันตรายต่อมนุษย์แล้ว ยังตกค้างในสิ่งแวดล้อม ดิน แหล่งน้ำธรรมชาติและผลิตภัณฑ์การเกษตร ทำให้คนทั่วไปที่ไม่ได้สัมผัสโดยตรง ได้รับผลกระทบต่อสุขภาพจากสารปนเปื้อนได้เช่นกัน

ก. ผลกระทบของพาราควอตที่มีต่อสิ่งแวดล้อม

ผลกระทบของพาราควอตที่มีต่อสิ่งแวดล้อมสารกำจัดศัตรูพืช ร้อยละ 99.9 เปอร์เซ็นต์ของสารกำจัดศัตรูพืช จะปนเปื้อนอยู่ในสิ่งแวดล้อมมีเพียงร้อยละ 0.1 เปอร์เซ็นต์ ที่จะไปถึงศัตรูพืชที่เป็นเป้าหมาย ภายหลังจากการฉีด พ่น หยด หรือหว่าน สารเคมีกำจัดศัตรูพืชจะถูกดูดซึมเข้าไปในพืชและอยู่บนต้นพืชบางส่วน และที่เหลือจะปลิวไปในอากาศหรือรอเวลา ที่แปลงเกษตรจะชะล้างสารเคมีลงสู่ดินหรือแหล่งน้ำใกล้เคียง ในการสลายตัวของสารกำจัดศัตรูพืชชั้นนี้ มีอัตราการสลายตัวหรือค่าครึ่งชีวิตมีความแตกต่างกัน ตามชนิดและสภาพแวดล้อม ในการใช้สารกำจัดศัตรูพืชชั้นส่วนใหญ่ ไม่สามารถใช้ให้มีผลเฉพาะศัตรูพืชที่ต้องการเท่านั้น ซึ่งทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตอื่นๆ และสิ่งแวดล้อม

ข. มลพิษทางดิน

มลพิษทางดิน หมายถึง ดินที่เสื่อมค่าไปจากเดิมหรือมีสารมลพิษเกินขีดจำกัดจนเป็นอันตรายต่อสุขภาพพืชนานาภัย ตลอดจนการเจริญเติบโตของพืชและสัตว์ ทั้งทางตรงและทางอ้อม สาเหตุการเกิดมลพิษทางดิน ที่เกิดจากการใช้สารเคมีกำจัดศัตรูพืชส่วนใหญ่แล้ว จะมีฤทธิ์ทำลายสิ่งมีชีวิตทุกชนิดไม่ว่าจะเป็นชนิดที่ให้ประโยชน์หรือโทษแก่ทางการเกษตร แม้แต่ผลกระทบต่อมนุษย์ สารเคมีที่สลายตัวได้ช้าจะตกค้างในดิน เช่น สารประเภท คลอรีนเทตไฮโดรคาร์บอนหรือออร์แกคลอรีน เป็นสารประกอบที่ประกอบด้วยอะตอมคลอรีน ได้แก่ ดีดีที ที่ใช้ในการควบคุมแมลง

ค. มลพิษน้ำ

มลพิษน้ำ หมายถึง สภาวะที่น้ำตามธรรมชาติถูกปนเปื้อนด้วยสิ่งแปลกปลอม และทำให้คุณภาพของน้ำเปลี่ยนแปลงไป ในทางที่เลวร้ายหรือคุณภาพเสื่อมโทรมลง และการใช้ประโยชน์จากน้ำนั้นลดลงหรืออาจใช้ประโยชน์ไม่ได้ สาเหตุเกิดจากจากการใช้สารเคมีกำจัดศัตรูพืช ส่วนใหญ่แล้วจะเกิดจะปนเปื้อนในแหล่งน้ำโดยวิธีการ เช่น การฉีดพ่นสารเคมีทางการเกษตรลงสู่แหล่งน้ำโดยตรง เพื่อกำจัดยุ่งและวัชพืชน้ำการกัดเซาะล้างดินของฝน การทิ้งหรือล้างภาชนะที่บรรจุสารเคมีลงแหล่งน้ำ การใช้ยาปราบศัตรูพืชในบริเวณพื้นที่เกษตรใกล้กับแหล่งน้ำ และน้ำที่ไหลผ่านหน้าดินในพื้นที่ที่มีการใช้สารเคมีก่อนลงสู่แหล่งน้ำ

2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Nadhem K. Hamadi และคณะ [40] งานวิจัยนี้ศึกษาการดูดซับสารกำจัดศัตรูพืชออกจากน้ำเสีย โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากยางรถยนต์ ตัวดูดซับผลิตจากกระบวนการไพโรไลซิสและผ่านกระบวนการกระตุ้น (TAC) เปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวดูดซับที่สังเคราะห์ได้ (TCA) กับถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ F300 (CAC) พบว่าการดูดซับของพาราควอตขึ้นอยู่กับค่า pH ขนาดของอนุภาค ปริมาณคาร์บอน อุณหภูมิ และความเข้มข้นเริ่มต้นของพาราควอต ในการทดสอบการดูดซับ พบว่าอัตราการดูดซับสูงสุดของพาราควอต 90 เปอร์เซ็นต์ ในเวลา 5 นาทีแรก จลนศาสตร์การดูดซับแบบจำลองปฏิกิริยาเคมีอันดับสองเทียม และเป็นไอโซเทอมแบบแลงเมียร์

Haijie Li และคณะ [13] งานวิจัยนี้ในการศึกษานี้ ได้เตรียมคาร์บอนสเฟียร์ (CS) ที่มีขนาดอนุภาค ประมาณ 700 นาโนเมตร และสังเคราะห์โดยวิธีการ Stober method จากนั้นกระตุ้นโดยการออกซิเดชันของกรดไนตริก เพื่อให้ได้ทรงกลมคาร์บอน (MCS) ที่มีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลและไนโตรล วิเคราะห์ SEM BET XRD Raman spectroscopy FTIR XPS พบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 636 ตารางเมตร/กรัม CS พื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 339 ตารางเมตร/กรัม MCS มีลักษณะเป็นกราฟีนและหมู่คาร์บอกซิลที่สูง ทำการทดลอง MCS ดูดซับพาราควอต (PQ) Chrysoidine G (CG) และ Malachite green (MG) ความสามารถในการดูดซับสูงสุดของ PQ CG และ MG เท่ากับ 134.63 299.44 และ 326.93 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ เปรียบเทียบแบบจำลองไอโซเทอมของ Langmuir Freundlich Temkin และ Dubinin-Radushkevich และจลนพลศาสตร์แบบ Pseudo-first-order Pseudo-second-order Elovich and Intra-particle diffusion kinetics models แบบจำลองการดูดซับสำหรับ PQ CG และ MG ดีที่สุดคือ Temkin Langmuir และ Freundlich isotherms ตามลำดับ และจลนพลศาสตร์ของการดูดซับแบบ Elovich นอกจากนี้ มีความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ได้ดี การประสิทธิภาพการดูดซับมากกว่า 80% หลังจากใช้ 5 รอบ

Haijie Li และคณะ [14] งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมโดยกระบวนการคาร์บอนในเซชัน เส้นใยขนเม็ล็ดของ *Metaplexis japonica* ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส และกระตุ้นด้วยกรดไนตริก (MCT-600) พบว่า MCT-600 มีสังเคราะห์ที่เหมาะสมและมีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลที่สูง การทดลองพบว่าอัตราการดูดซับที่รวดเร็วสมดุลการดูดซับภายใน 20 นาที ความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 218.61 มิลลิกรัมต่อกรัม และความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่มากกว่า 5 ครั้ง และพบว่าเป็นไอโซเทอมแลงเมียร์และแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม

W. -T. Tsai และคณะ [41] งานวิจัยนี้ศึกษาตัวดูดซับจากถ่านไบโอชาร์จากมูลสุกร เพื่อดูดซับ พาราควอต การทดลองพบว่าระบบการดูดซับแบบ Batch ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยศึกษา pH 4.5 6.0 7.5 และ 9.0 ความเข้มข้นของพาราควอต 0.5 1.0 2.0 4.0 และ 6.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และ ปริมาณถ่านไบโอชาร์จากมูลสุกร 0.10 0.15 0.20 0.25 และ 0.30 กรัม/ลิตร พบว่า ค่าความสัมพันธ์ใน การดูดซับระหว่างพาราควอตและตัวดูดซับคาร์บอน จลนพลศาสตร์แบบ Pseudo-second order model ผลจากการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าถ่านไบโอชาร์ที่ได้จากชีวมวลสามารถใช้เป็นตัวดูดซับที่มีต้นทุน ต่ำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสังเคราะห์คาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนเมตรจากใบปาล์มน้ำมันโดยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันร่วมกับการกระตุ้นทางเคมี เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นตัวดูดซับพาราควอต โดยทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชัน ได้แก่ อุณหภูมิ เวลา และอัตราส่วนโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จากนั้นทำการเปรียบเทียบอรรถิพลในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันร่วมกับการกระตุ้นทางเคมี เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับคาร์บอนที่มีความเป็นรูพรุนที่มีพื้นผิวจำเพาะและขนาดของรูพรุนคาร์บอนในระดับนาโนเมตร จากนั้นนำคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ ไปทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับพาราควอต ไอโซเทอมการดูดซับ จลนพลศาสตร์การดูดซับ และการศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ของคาร์บอน

3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 อุปกรณ์

1. ถังปฏิกรณ์สำหรับกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล (Autoclave) และภาชนะเทฟลอนสำหรับบรรจุในถังปฏิกรณ์ไฮโดรเทอร์มัล (Teflon)
2. เตาเผาสารแบบแนวนอน (Horizontal Tube Furnace)
3. ภาชนะใส่สารสำหรับทำปฏิกิริยาคาร์บอนไนเซชัน (Boat)
4. ตู้อบ (Electrical oven)
5. เครื่องชั่งสารแบบดิจิตอล (Digital balance)
6. เครื่องบด (Grinder)
7. กระดาษลิตมัส (Litmus)
8. กระดาษกรอง (Filter paper)
9. แท่งแก้ว (Stirring Rod)
10. ปีกเกอร์ (Beaker)
11. กระบอกตวง (Cylinder)
12. ช้อนตักสาร (Spatula)

3.1.2 วัสดุและสารเคมี

1. ใบปาล์มน้ำมัน (Oil palm leave)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)
3. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid)
4. โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide)

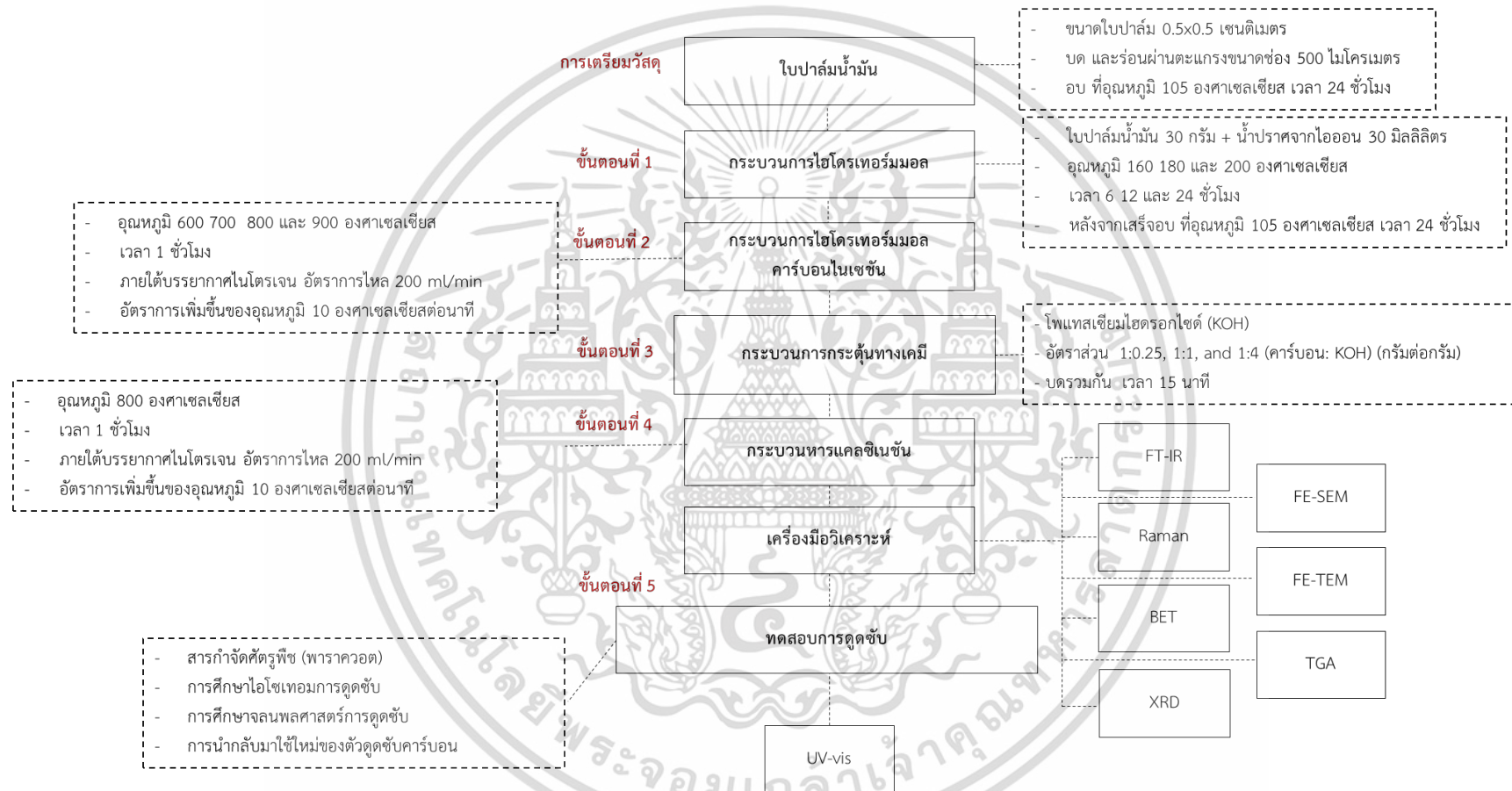
3.1.3 เครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์คาร์บอน

1. การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field Emission Scanning Electron Microscope)
2. การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบทรานสมิสชัน (Transmission Electron Microscope)
3. เครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) รุ่น Perkin Elmer Spectrum Two
4. การวิเคราะห์ด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี (Raman Spectroscopy) รุ่น DXR Smart Raman Spectrometer
5. การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric Analysis)
6. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction) รุ่น Smart Lab
7. การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Brunauer–Emmett–Teller Nitrogen adsorption รุ่น Micro Active for ASAP2460

3.2 การเตรียม การสังเคราะห์ และการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ของไบปาล์มน้ำมัน

การศึกษาการสังเคราะห์นาโนพอร์สคาร์บอนในระดับนาโนเมตรจากไบปาล์มน้ำมันโดยอาศัยกระบวนการร่วมกัน คือ กระบวนการไฮโดรเทอร์มัล กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน และกระบวนการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 สามารถแบ่งการทดลองย่อยได้เป็น 3 การทดลองดังนี้

รูปที่ 3.1 ระเบียบวิธีการเตรียม การสังเคราะห์ การกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และการศึกษาการดูดซับ



3.2.1 การเตรียมไบโพลีเมอร์น้ำมัน

1. นำไบโพลีเมอร์น้ำมันไปตากแห้งด้วยแสงแดด จากนั้นทำการตัดไบโพลีเมอร์น้ำมันให้มี ขนาดประมาณ 0.5x0.5 เซนติเมตร
2. นำตัวอย่างไบโพลีเมอร์น้ำมันที่ตัดไว้แล้วไปอบให้แห้งเพื่อไล่ความชื้นอีกครั้ง ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จนกว่าไบโพลีเมอร์น้ำมันจะปราศจากความชื้น
3. นำตัวอย่างไบโพลีเมอร์น้ำมันที่อบจนแห้งสนิท มาปั่นด้วยเครื่องปั่นจนได้เป็นผงและเส้นใยทำการร่อนไบโพลีเมอร์น้ำมันด้วยตะแกรงร่อนที่มีขนาดช่อง 500 ไมโครเมตร สิ่งที่ได้ออกมาจะเรียกว่า ผงไบโพลีเมอร์น้ำมัน ส่วนที่เป็นเส้นใยหรือส่วนที่ไม่ผ่านตะแกรงร่อนให้ทำการบดอีกครั้ง แล้วจึงทำการร่อนผ่านตะแกรงร่อนอีกครั้ง
4. นำตัวอย่างที่เป็นผงไบโพลีเมอร์ใส่ภาชนะและทำการอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง อีกครั้งเพื่อลดความชื้นเป็นครั้งสุดท้ายก่อนจะผ่านไปทำการบวกรวมต่อไป

3.2.2 การศึกษาปัจจัยในการสังเคราะห์คาร์บอนจากไบโพลีเมอร์น้ำมันโดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล

1. ชั่งผงไบโพลีเมอร์น้ำมันน้ำหนัก 30 กรัม ใส่บีกเกอร์ ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. เตรียมน้ำที่ปราศจากไอออน (De-ionized water) 60 มิลลิลิตร ใส่ในบีกเกอร์ 250 มิลลิลิตร แล้วทำการผสมผงไบโพลีเมอร์น้ำมันและน้ำให้เข้ากัน
3. จากนั้นใส่ลงในภาชนะเทฟลอน แล้วจึงนำภาชนะเทฟลอนใส่ลงในถังปฏิกรณ์ไฮโดรเทอร์มัลในตู้อบโดยใช้เงื่อนไขของอุณหภูมิและเวลา ดังนี้ 160 180 และ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 12 และ 24 ชั่วโมง
4. จากนั้นนำถังปฏิกรณ์ออกจากตู้อบแล้วปล่อยให้เย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้อง
5. นำไบโพลีเมอร์น้ำมันที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลออกจากถังปฏิกรณ์แล้วใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร จากนั้นนำเข้าสู่ตู้อบเพื่ออบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง สิ่งที่ได้ออกมาเรียกว่า ไบโอชาร์ หลังจากอบให้ทำการชั่งน้ำหนักตัวอย่าง หลังจากผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล แล้วเก็บตัวอย่างใส่ในภาชนะที่ปราศจากความชื้น
6. นำตัวอย่างไบโอชาร์ไปทำการตรวจเครื่องมือวิเคราะห์ FTIR และ XRD เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดสำหรับทำขั้นตอนต่อไป

3.2.3 ศึกษาปัจจัยในการสังเคราะห์คาร์บอนจากไบโพลีเมอร์น้ำมันโดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชัน

1. ชั่งไบโพลีเมอร์จากไบโพลีเมอร์ที่ผ่านการไฮโดรเทอร์มัลไลในภาชนะโบลสำหรับเผาน้ำหนัก 5 กรัม
2. ภาชนะโบลถูกนำเข้าสู่เตาเผาแบบแนวนอน จากนั้นทำกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ ดังนี้ 600 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และภายใต้สภาวะบรรยากาศไนโตรเจนที่ความเร็วการไหลของแก๊ส 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที สิ่งที่ได้ออกมาเรียกว่า คาร์บอน
3. หลังจากทำการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันแล้ว นำคาร์บอนเก็บไว้ในภาชนะปราศจากความชื้นปิดสนิท
4. นำตัวอย่างคาร์บอนไปทำการตรวจเครื่องมือวิเคราะห์ FTIR Raman Spectroscopy TGA และ XRD เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดสำหรับทำขั้นตอนต่อไป

3.2.4 ศึกษาปัจจัยในการสังเคราะห์คาร์บอนที่มีรูพรุนระดับนาโนเมตรจากไบโพลีเมอร์น้ำมันโดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันและกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

1. ชั่งคาร์บอนที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันจากไบโพลีเมอร์น้ำมันในภาชนะปิ๊กเกอร์ 250 มิลลิลิตร
2. ชั่งโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ชนิดเม็ด ทำการบดให้ละเอียดเป็นผง จากนั้นทำการใส่ในปิ๊กเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วทำการผสมโดยอัตราส่วนในการเตรียมคาร์บอนและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์อัตราส่วน 1:0.25 1:1 และ 1:4 (คาร์บอน:โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์)
3. จากนั้นนำคาร์บอนที่ผสมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เทใส่โถรงบดสาร ทำการบดผสมสารให้เข้ากันอีกครั้งโดยใช้การบดผสมสารที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เวลา 12 ชั่วโมงเพื่อไล่ความชื้น
4. นำคาร์บอนและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์อัตราส่วนต่างๆ ใส่ในภาชนะโบลสำหรับเผาน้ำหนัก
5. ภาชนะโบลถูกนำเข้าสู่เตาเผาแบบแนวนอน จากนั้นทำกระบวนการแคลซิเนชันที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และภายใต้สภาวะบรรยากาศไนโตรเจนที่ความเร็วการไหลของแก๊ส 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที สิ่งที่ได้ออกมาเรียกว่า นาโนพอร์สคาร์บอน
6. หลังจากนั้นทำการล้างตัวรองรับคาร์บอนที่ผ่านการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์โดยปรับให้มีค่า pH ประมาณ 7 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.5 M หลังจากนั้นทำการล้างด้วยน้ำ (De-ionized water)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. หลังจากทำการล้างตัวอย่างถูกนำมาอบเพื่อไล่ความชื้นจนแห้งในตู้อบอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นเก็บตัวอย่างใส่ภาชนะปราศจากความชื้นปิดสนิท
8. นำตัวอย่างนาโนพอร์สคาร์บอนไปทำการตรวจเครื่องมือวิเคราะห์ FE-Sem TEM FTIR XPS Raman Spectroscopy BET และ XRD เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดสำหรับทำขั้นตอนต่อไป

3.3 การทดสอบปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับพาราควอต

การทดสอบปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับพาราควอตที่มีเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากนั้นนำสารละลายมาเจือจางเพื่อให้ได้สารละลายพาราควอตที่ ความเข้มข้นต่างๆ ตามที่ต้องการในการศึกษาการดูดซับของงานวิจัยนี้ได้ใช้การดูดซับแบบกะ (Batch adsorption) โดยศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นจนถึงสุดท้ายของสารละลายพาราควอต เวลาในการดูดซับและการนำกลับมาใช้ใหม่ของคาร์บอน

การศึกษาเวลาในการดูดซับและความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายพาราควอตเพื่อหาเวลาที่สมดุลของการดูดซับและความเข้มข้นที่เหมาะสม โดยการชั่งตัวดูดซับปริมาณ 0.5 กรัม บรรจุลงในขวดตัวอย่างแล้วเติมสารละลายพาราควอตความเข้มข้นของพาราควอต 25 50 100 150 200 300 และ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ของสารละลายปริมาตร 500 มิลลิลิตร นำขวดตัวอย่างมาเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที โดยเวลาในการดูดซับที่ศึกษา คือ 10 20 30 40 60 90 120 และ 180 นาที และทำการศึกษาการดูดซับที่อุณหภูมิห้อง และ pH = 7 เมื่อครบเวลาที่กำหนดนำของผสมผ่านตัวกรองขนาด 0.44 ไมโครเมตร ปริมาตรของสารละลาย 5 มิลลิลิตร จากนั้นนำวิเคราะห์หาความเข้มข้นของพาราควอตด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 257 นาโนเมตร

การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับใช้ข้อมูลจากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นและความเข้มข้นสุดท้าย ในการดูดซับเพื่อนำมาสร้างแบบจำลอง Langmuir Isotherm Freundlich Isotherm Temkin Isotherm และ Jovanovic Isotherm โดยสมการจากแบบจำลองทั้งสี่แบบสามารถนำไปใช้ในการอธิบายการดูดซับบนผิวตัวดูดซับที่มีผลกระทบท่อตัวถูกดูดซับได้

การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับได้ใช้ข้อมูลจากการศึกษาเวลาในการดูดซับ เพื่อนำมาสร้างแบบจำลอง Pseudo-first order Pseudo-second order Elovich และ Inter-Particle Diffusion โดยสมการจากแบบจำลองทั้งสี่แบบสามารถนำไปใช้ในการอธิบายการดูดซับบนผิวตัวดูดซับที่มีผลกระทบท่อตัวถูกดูดซับได้

3.4 การนำกลับมาใช้ใหม่ของคาร์บอน

การศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการนำกลับมาใช้ใหม่ โดยการชั่งตัวดูดซับปริมาณ 0.5 กรัม บรรจุลงในขวดตัวอย่างแล้วเติมสารละลายพาราควอตความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ของสารละลายปริมาตร 500 มิลลิตร โดยเวลาในการดูดซับที่ศึกษา คือ 10 นาที นำขวดตัวอย่างมาเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง และ pH 7 เมื่อครบเวลาที่กำหนดนำของผสมผ่านตัวกรองขนาด 0.44 ไมโครเมตร ปริมาตร 5 มิลลิตร จากนั้นจึงนำวิเคราะห์หาความเข้มข้นของพาราควอตด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 257 นาโนเมตร จากนั้นนำคาร์บอนที่ได้มาทำการเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนและออกซิเจน แล้วทำการเปรียบเทียบผลจากการนำกลับมาใช้ใหม่ ภายใต้บรรยากาศที่แตกต่างกัน และครั้งสุดท้ายนำคาร์บอนที่ได้ไปทำการตรวจเครื่องมือวิเคราะห์ FTIR Raman และ XRD เพื่อเปรียบเทียบก่อนใช้และหลังจากการนำกลับมาใช้ใหม่ของคาร์บอน

3.5 การตรวจวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ

นำตัวอย่างไบโพลีเมอร์น้ำมันที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันและกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ไปทำการวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติต่างๆ ดังนี้

3.5.1 การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)

การศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology) โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field Emission Scanning Electron Microscope; FE-SEM) (รุ่น Zeiss EVO MA10) ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ โดยตัวอย่างจะต้องถูกเคลือบด้วยทองโดยใช้วิธี Sputtering ก่อนทำการวัดเพื่อให้ตัวอย่างมีพื้นผิวที่ นำไฟฟ้าทำให้ได้ภาพที่คมชัดมากยิ่งขึ้น โดยในการศึกษาจะใช้ความต่างศักย์ในการเร่งอิเล็กตรอน 10 kV และกำลังขยาย 20000X และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบทะลุผ่านชนิดฟิลด์อิมิสชัน (Field emission transmission electron microscope; TEM) ของวัสดุโดยใช้อิเล็กตรอนส่องผ่าน (รุ่น JEOL JEM-3100F) กล้องจุลทรรศน์ที่แรงดัน 300 กิโลโวลต์ ตัวอย่างจะถูกนำไปกระจายตัวในเอทานอล จากนั้นนำไปหยดลงบนตะแกรง Cu ที่เคลือบด้วยฟิล์มคาร์บอนและทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง ก่อนนำไปทำการวัด

3.5.2 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

(Fourier Transform Infrared Spectroscopy)

การศึกษาหมู่ฟังก์ชัน (Functional group) บนพื้นผิวของตัวอย่างโดยเครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (รุ่น Perkin Elmer Spectrum Two) และทำการวิเคราะห์โดยใช้โหมด ART สแกนในช่วงเลขคลื่นตั้งแต่ 400 cm^{-1} ถึง 4000 cm^{-1} ตัวอย่างถูกใส่ลงในแพลตฟอร์มอินฟราเรดและชั้นสกรูโดยตรงก่อนที่จะทำการวัด

3.5.3 การศึกษาความไม่เป็นผลึกด้วยเครื่องรามานสเปกโทรสโกปี (Raman Spectroscopy)

การวิเคราะห์รามานสเปกโตรมิเตอร์ DXR Micro-scope ของบริษัท Thermo Scientific (วอลแทมมัม แมสซาชูเซตส์ สหรัฐอเมริกา) ใช้เลเซอร์ Nd:YAG แบบโซลิตสแตต (ความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร กำลังสูงสุด 10 มิลลิวัตต์) ที่บันทึกได้ตั้งแต่ 500 ถึง $2,500\text{ cm}^{-1}$ ตะแกรงขนาด 900 เส้นต่อมิลลิเมตร และช่องรับแสงสลิต 25 ไมโครเมตร เงื่อนไขการวัดสำหรับตัวอย่างคือพลังงานเลเซอร์ 10 มิลลิวัตต์ เวลาในการตรวจจับ 10 วินาทีต่อการสแกน และการทำซ้ำ 20 ครั้ง สิบสเปกตรัมถูกเฉลี่ยจากแต่ละพื้นผิว ข้อมูลถูกประมวลผลโดยใช้ซอฟต์แวร์ Omnic 9 (Thermo Scientific, Waltham, MA, USA)

3.5.4 การศึกษาความเป็นผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction)

การศึกษาความเป็นผลึก (Crystallinity) ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction; XRD) (รุ่น Smart Lab) เพื่อหาองค์ประกอบธาตุและสารประกอบที่มีอยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับคาร์บอนชีวมวลจากใบปาล์ม น้ำมัน และทำการวิเคราะห์โดยใช้โหมด Theta-2Theta โดยใช้มุมในการสแกนตั้งแต่ 10° ถึง 90° และใช้ $\text{CuK}\alpha$ เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์เรย์

3.5.5 การศึกษาพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนด้วยวิธี Brunauer-Emmett-Teller

เพื่อศึกษาพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนด้วยวิธี Brunauer-Emmett-Teller (รุ่น Micro Active for ASAP2460) โดยทำการวัดการดูดซับและคายซับแก๊สไนโตรเจนของตัวอย่าง การวิเคราะห์จะใช้ตัวอย่างที่เป็นผงบรรจุลงในเซลล์แก้วที่มีลักษณะเป็นกระเปาะ ลักษณะรูพรุนสัมพันธ์รวมถึงพื้นที่ผิวจำเพาะและความพรุน ถูกวิเคราะห์โดยการวิเคราะห์การดูดซับ-คายซับของไนโตรเจน ที่ -196 องศาเซลเซียส โดยใช้ Quantachrome Autosorp iQ-MP-XR แบบจำลอง Brunauer-Emmett-Teller ใช้เพื่อกำหนดพื้นที่ผิว BET (S_{BET}) พื้นที่ผิวไมโครพอร์สและพื้นที่ผิวภายนอกคำนวณโดยวิธี V_t วิเคราะห์การกระจายขนาดรูพรุนโดยใช้แบบจำลองทฤษฎีฟังก์ชันความหนาแน่น (DFT) ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(V_{total}) คำนวณโดยใช้วิธี Barrett–Joyner–Halenda (BJH) ที่ความดันสัมพัทธ์ 0.99 การกระจายขนาดไมโครพอร์ส (D_{mic}) และเมโซพอร์ส (D_{mes}) ได้มาจากแบบจำลอง Density Functional Theory (DFT) การกระจายขนาดรูพรุนเฉลี่ย ($D_{average}$) คำนวณโดยแบบจำลอง Density Functional Theory (DFT)

3.5.6 การศึกษาความเข้มข้นของพาราควอตด้วยเครื่อง ยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรสโคปี (Ultraviolet–visible spectroscopy)

เครื่องมือที่ใช้ในวิเคราะห์สารโดยอาศัยหลักการดูดกลืนรังสีของสารที่อยู่ในช่วง Ultra violet (UV) และ Visible (VIS) ความยาวคลื่นประมาณ 190-1000 นาโนเมตร ส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อนหรือสารอนินทรีย์ทั้งที่มีสีและไม่มีสี สารแต่ละชนิดจะดูดกลืนรังสีในช่วงความยาวคลื่นที่ต่างกันไปและปริมาณการดูดกลืนรังสีก็ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารนั้น การดูดกลืนแสงของสารต่างๆ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสาร จึงสามารถวิเคราะห์ได้ในเชิงคุณภาพและปริมาณและใช้กันอย่างแพร่หลาย ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) และค่าความยาวคลื่น (Wavelength) ซึ่งเรียกว่า Spectrum ต่อมาในการสร้างกราฟมาตรฐาน (Calibration curve) ในช่วงความเข้มข้น 2.5 5 10 ppm โดยเจือจางจากสารละลายมาตรฐานพาราควอต ความเข้มข้น 275 ppm วัดค่าดูดกลืนแสงของสารละลายที่ความยาวคลื่น 257 นาโนเมตร

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

การดูดซับที่ใช้ในทางอุตสาหกรรมมักนิยมเตรียมในรูปของถ่านกัมมันต์ ซึ่งมีข้อดีในเรื่องประสิทธิภาพในการดูดซับที่สูง ต้นทุนการเตรียมตัวดูดซับต่ำกว่าวิธีการอื่นๆ และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการนำกลับมาใช้ซ้ำๆ งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการเตรียมตัวดูดซับจากไบโพลีเมอร์ที่เป็นวัสดุเหลือทิ้ง เพื่อใช้ในการดูดซับพาราควอต งานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้ ขั้นตอนแรกเป็นการเตรียมตัวดูดซับจากไบโพลีเมอร์ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันร่วมกับการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่เงื่อนไขต่างๆ จากนั้นทำการศึกษาสมบัติต่างๆ ของตัวดูดซับและเลือกเงื่อนไขที่ดีที่สุด ขั้นตอนที่สองนำตัวดูดซับที่สังเคราะห์ได้ มาศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอโซเทอมของการดูดซับ จลนพลศาสตร์ของการดูดซับและศึกษาการนำกลับมาใช้ซ้ำของตัวดูดซับเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมโดยรายละเอียดมีดังต่อไปนี้

4.1 การศึกษาอุณหภูมิและเวลาของกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลของไบโพลีเมอร์

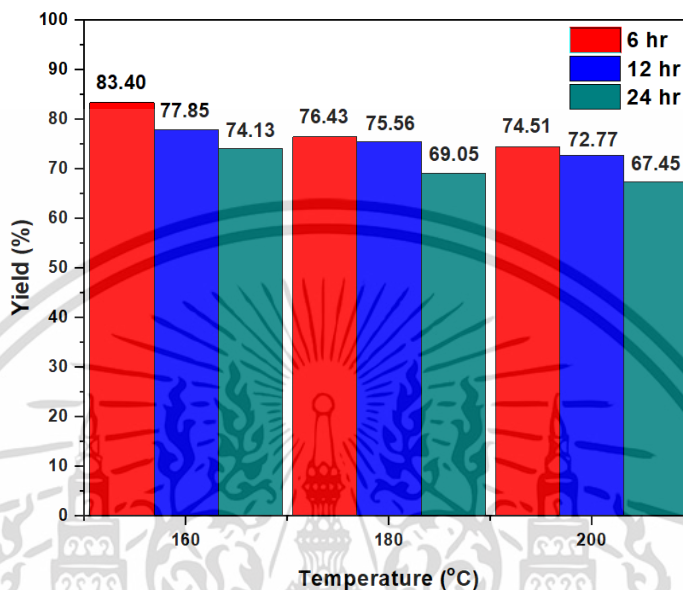
การศึกษาอุณหภูมิและเวลาของกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล เป็นกระบวนการสำหรับเตรียมไบโพลีเมอร์ ให้เกิดความพร้อมสำหรับทำการกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลและเตรียมโครงสร้างของวัสดุสำหรับทำการกระบวนการต่อไปโดย กระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่ใช้ในการทดลองนี้จะเริ่มที่อุณหภูมิ 160 180 และ 200 องศาเซลเซียส ที่เวลา 6 12 และ 24 ชั่วโมง จากนั้นเลือกศึกษาสมบัติต่างๆ ของวัสดุเพื่อเลือกเงื่อนไขที่ดีที่สุดต่อไป

4.1.1 การศึกษาร้อยละผลได้ของกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลของไบโพลีเมอร์

ศึกษาร้อยละผลได้ของไบโพลีเมอร์ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 160 180 และ 200 ที่เวลา 6 12 และ 24 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 4.1 พบว่าเมื่ออุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มัลเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของไฮโดรคาร์บอนน้ำหนักลดลงจากเดิม เนื่องจากอุณหภูมิและเวลาที่เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อการสลายตัวของโครงสร้างไบโพลีเมอร์ โดยการทำให้โมเลกุลของน้ำสามารถแพร่เข้าไปทำลายโครงสร้างเอมิเซลลูโลสและเซลลูโลส ของไบโพลีเมอร์ได้มากขึ้น ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแตกหักเป็นพอลิเมอร์สายสั้น โครงสร้างบางส่วนมีการสลายตัวไปเป็นของเหลว เช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทาร์ และแก๊ส เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน เป็นต้น จะส่งผลให้สูญเสีย น้ำหนักของไฮโดรซาร์ลดลง ผลผลิตของไฮโดรซาร์ ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง ให้อ้อยละผลได้ของน้ำหนักไฮโดรซาร์มีผลผลิตต่ำที่สุด

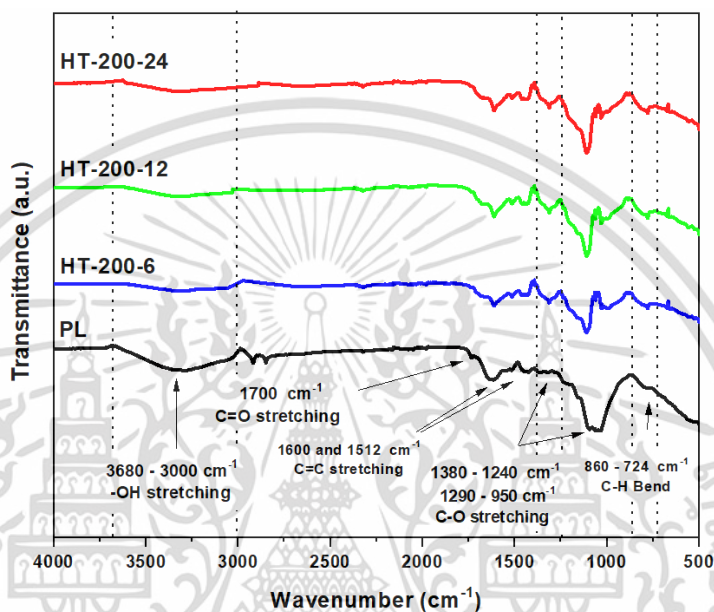


รูปที่ 4.1 ร้อยละผลได้ของไบโพลัมของไฮโดรซาร์ที่อุณหภูมิ 160 180 และ 200 ที่เวลา 6 12 และ 24 ชั่วโมง

4.1.2 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของไฮโดรซาร์ของไบโพลัมน้ำมัน

การศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของไฮโดรซาร์ที่ได้จากการกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ที่เวลา 6 12 และ 24 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับไบโพลัมน้ำมัน (PL) แสดงดังรูป 4.2 พบว่าเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มัลเพิ่มมากขึ้น ทำให้มีการลดลงของตำแหน่งพีด $3680-3000\text{ cm}^{-1}$ ของ OH-stretching ซึ่งเป็นหมู่ไฮดรอกซิลของลิกนิน เนื่องจากลิกนินมีความเสถียรทางความร้อนจึงมีการสลายตัวได้เล็กน้อย ต่อมาการลดลงของตำแหน่งพีดในช่วง $1290-950\text{ cm}^{-1}$ และ $1380-1240\text{ cm}^{-1}$ ของ C-O stretching คือ C-O ของหมู่เอเทอร์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลส จะสามารถสลายตัวได้มาก ตั้งแต่ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส และการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสระหว่างทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มัล จะก่อให้เกิดโครงสร้างอะโรมาติกที่ตำแหน่งพีด $1600\ 1512$ และ $860-724\text{ cm}^{-1}$ และในทางตรงกันข้ามโครงสร้างลิกนิน เป็นโครงสร้างที่มีความเสถียร และยังคงอยู่ในโครงสร้างไฮโดรซาร์หลังจากการกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล นอกจากระหว่างกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลยังมีการลดลงที่ตำแหน่งพีด 1700 cm^{-1} ของ C=H stretching เป็น

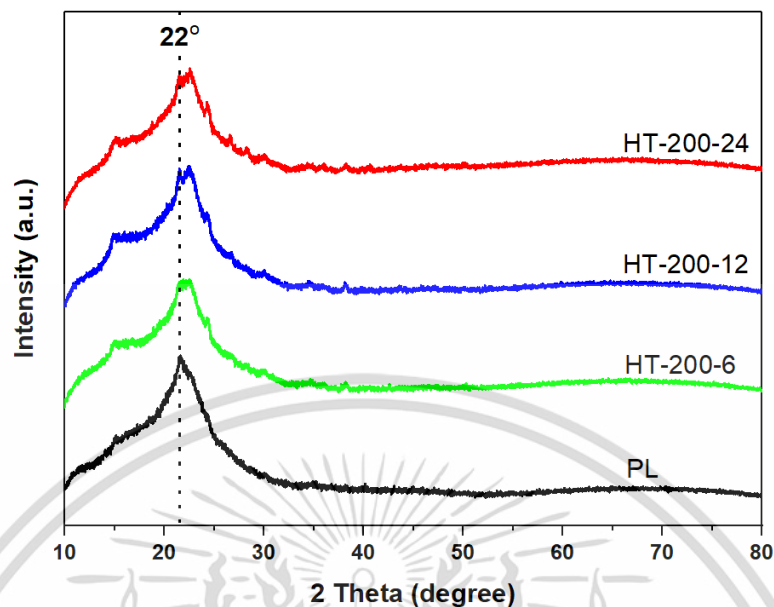
หมู่คาร์บอกซิลิก คีโตน และอัลดีไฮด์ จากเซลลูโลสและลิกนิน ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรชันของหมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งเป็นปฏิกิริยาการสลายตัวของเอมิเซลลูโลสและเซลลูโลส โดยที่เงื่อนไขที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มัล ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ทำให้องค์ประกอบเอมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน สลายตัวมากที่สุด และยังส่งผลทำให้พื้นที่ผิวของไฮโดรคาร์บอนมีหมู่อะโรมาติกมากที่สุด



รูปที่ 4.2 กราฟ FT-IR ของไบโพลีม์น้ำมัน (PL) ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 6 (HT-200-6) 12 (HT-200-12) และ 24 (HT-200-24)

4.1.3 การศึกษาความเป็นผลึกของไฮโดรคาร์บอนของไบโพลีม์น้ำมัน

การศึกษาความเป็นผลึกของไฮโดรคาร์บอนที่ได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ที่เวลา 6 12 และ 24 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับไบโพลีม์น้ำมัน แสดงดังรูปที่ 4.3 พบว่าโครงสร้างเดิมของตัวไบโพลีม์น้ำมัน มีโครงสร้างของเซลลูโลสที่ ตำแหน่งพีค 22° degree และเมื่อผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ที่เวลา 6 12 และ 24 ชั่วโมง ยังคงมีตำแหน่งพีค 22° degree แสดงถึงยังคงมีเซลลูโลสอยู่ในโครงสร้าง



รูปที่ 4.3 กราฟ XRD ของไบปาล์มน้ำมัน (PL) ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 6 (HT-200-6) 12 (HT-200-12) และ 24 (HT-200-24) ชั่วโมง

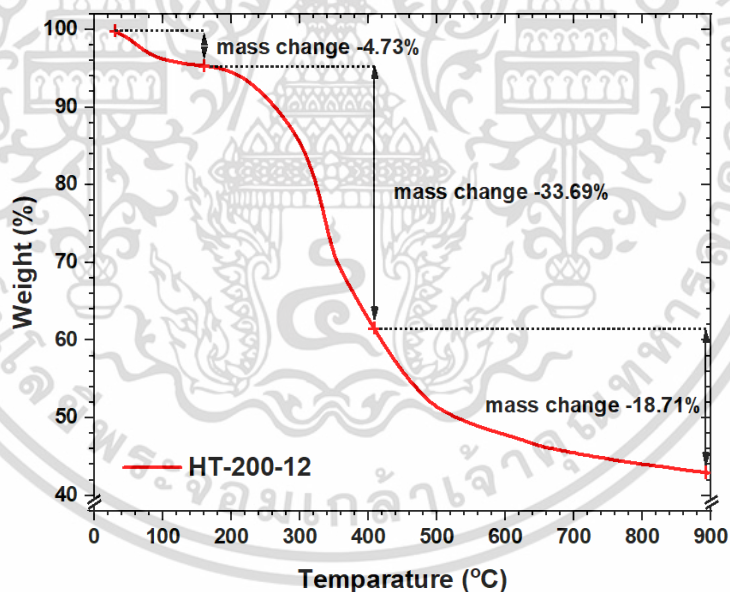
จากผลการทดลองร้อยละผลได้ FTIR และ XRD ของกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เวลา 12 และ 24 ชั่วโมง มีโครงสร้างของไฮโดรคาร์บอเนต ฟังก์ชัน และองค์ประกอบคาร์บอนไม่ต่างกัน งานวิจัยนี้เลือกกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เวลา 12 ชั่วโมง เนื่องจากให้ร้อยละผลได้สูงกว่าประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ และใช้เวลาน้อยกว่า 12 ชั่วโมง ซึ่งเป็นการประหยัดพลังงาน และมีความเป็นโครงสร้างรูพรุนของคาร์บอนที่ดีกว่า

4.2 การศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของไบปาล์มน้ำมันที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล

จากการศึกษาที่ 4.1 การศึกษาอุณหภูมิและเวลาของกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเลือกไบปาล์มน้ำมันที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เวลา 12 ชั่วโมงเหมาะสมที่สุดสำหรับทำกระบวนการต่อไป ต่อมาศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของไบปาล์มน้ำมันที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลข้างต้น กระบวนการนี้จะเป็นการหาช่วงอุณหภูมิสำหรับทำกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนโนเซชัน

ศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของไบปาล์มน้ำมันที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เวลา 12 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 4.4 พบว่าสามารถแบ่งระยะการสลายตัวเป็นสามช่วง

คือ ช่วงแรกเกิดที่อุณหภูมิห้องถึง 175 องศาเซลเซียส มีการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักลดลง 4.73 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นผลมาจากการสูญเสียความชื้นของไบโพลีเมอร์ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชัน ต่อมาช่วงที่สองเกิดที่อุณหภูมิ 175 ถึง 420 องศาเซลเซียส มีการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักลดลง 33.69 เปอร์เซ็นต์ เป็นผลมาจากการสลายตัวของไบโพลีเมอร์ที่ปลดปล่อยสารระเหยออกมา และเป็นช่วงที่ปลดปล่อยสารระเหยได้เยอะที่สุด และช่วงสุดท้ายที่อุณหภูมิ 420 ถึง 900 องศาเซลเซียส มีการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักลดลง 18.71 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นผลมาจากการสลายตัวของสารระเหยแต่เมื่อเวลาเพิ่มมากในสารระเหยได้มีปริมาณน้อยลง ทำให้คาร์บอนมีปริมาณมากขึ้น และจะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิหลังจาก 800 องศาเซลเซียส น้ำหนักจะค่อนข้างคงที่เนื่องมาจากสารระเหยได้มีการสลายออกไปจากตัวไบโพลีเมอร์จนใกล้จะหมดในโซนนี้จะเหลือเพียงองค์ประกอบที่เป็นคาร์บอนและเถ้าจากผลการทดลองจึงสรุปได้ว่า ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดสำหรับสังเคราะห์เป็นคาร์บอน มีอุณหภูมิระหว่าง 600-900 องศาเซลเซียส เนื่องจากน้ำหนักจะค่อนข้างคงที่ เนื่องมาจากสารระเหยได้มีการสลายออกไปจากไบโพลีเมอร์จนใกล้จะหมดในโซนนี้จะเหลือเพียงองค์ประกอบที่เป็นคาร์บอนและเถ้า



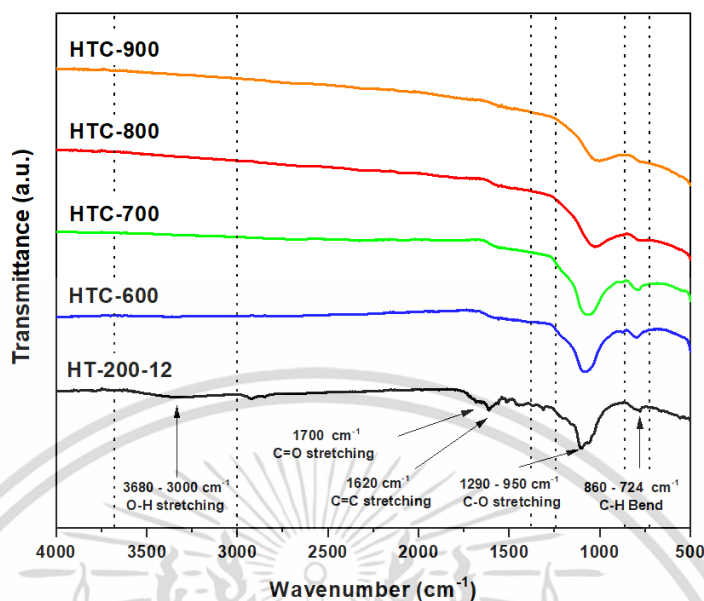
รูปที่ 4.4 กราฟ Thermogravimetric analysis (TGA) ของไบโพลีเมอร์ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ที่เวลา 12 ชั่วโมง (HT-200-12)

4.3 การศึกษาอุณหภูมิของกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชัน

จากการศึกษาที่ 4.2 การศึกษาการสลายตัวของไบโพลีเมอร์ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาอยู่ในช่วง 600-900 องศาเซลเซียส กระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชัน จึงเลือกที่อุณหภูมิ 600 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน กระบวนการนี้จะปรับปรุงโครงสร้างให้มีเป็นคาร์บอนมากที่สุด โดยศึกษาสมบัติต่างๆ ของวัสดุ เพื่อเลือกเงื่อนไขที่ดีที่สุดต่อไป

4.3.1 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนผิวของตัวรองรับคาร์บอน

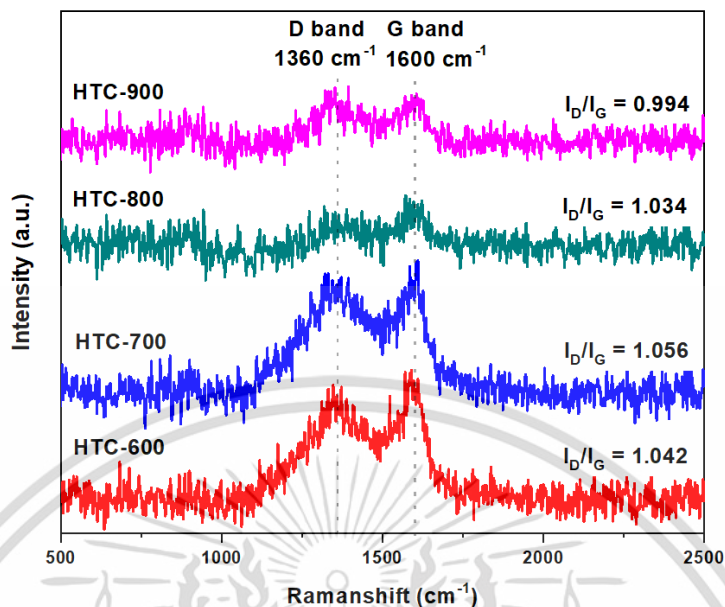
รูปที่ 4.5 กราฟ FT-IR ของไบโพลีเมอร์ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ที่เวลา 12 ชั่วโมง และผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชัน ที่อุณหภูมิ 600 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส ที่เวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน พบว่ากระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชัน ที่อุณหภูมิ 600-900 องศาเซลเซียส ทำให้ตำแหน่งพีกในช่วง 3680-3000 cm^{-1} คือ OH-stretching ซึ่งเป็นหมู่ไฮดรอกซิลของลิกนินเกิดการสลายตัวไปจนหมด ต่อมาตำแหน่งพีก 1620 cm^{-1} คือ C=C stretching และตำแหน่งพีก 860-724 cm^{-1} คือ C-H bend ซึ่งเป็นโครงสร้างอะโรมาติก และตำแหน่งพีกที่ 1700 cm^{-1} คือ C=O stretching ซึ่งเป็นหมู่คาร์บอกซิลิก คีโตน และอัลดีไฮด์ ของเซลลูโลสและลิกนิน เกิดการสลายตัวไปจนหมดหลังจากกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 600-900 องศาเซลเซียส ต่อมาตำแหน่งพีกในช่วง 1290-950 cm^{-1} คือ C-O stretching ซึ่งเป็นของ C-O ของหมู่เอเทอร์ เป็นองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลส เริ่มมีการสลายตัวไปเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 600-900 องศาเซลเซียส และจะเห็นได้ว่า ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส จะมีการสลายตัวออกไปจนใกล้จะหมด เนื่องจากองค์ประกอบาร์ จากเฮมิเซลลูโลสและสารระเหยต่างๆ เช่น ไนโตรเจน ไฮโดรเจน ออกซิเจน จะถูกกำจัดออกจากโครงสร้างของคาร์บอนที่อุณหภูมิมากกว่า 900 องศาเซลเซียส ดังนั้นจากผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของคาร์บอน พบว่าผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 12 ชั่วโมง และผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด



รูปที่ 4.5 กราฟ FT-IR ของใบปาล์มน้ำมันที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 12 ชั่วโมง (HT-200-12) และผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชัน อุณหภูมิ 600 (HTC-600) 700 (HTC-700) 800 (HTC-800) และ 900 (HTC-900) องศาเซลเซียส ใช้เวลา 1 ชั่วโมง ภายในบรรยากาศไนโตรเจน

4.3.2 การศึกษาความเป็นโครงสร้างอสัณฐานของตัวรองรับคาร์บอน

รูปที่ 4.6 กราฟ Raman spectroscopy ของใบปาล์มน้ำมันที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 12 ชั่วโมง และผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 600 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 1 ชั่วโมง ภายในบรรยากาศไนโตรเจน แสดงให้เห็น D band ตำแหน่งพิกัด 1360 cm^{-1} แสดงถึงความผิดปกติหรือข้อบกพร่องของโครงสร้างภายในโครงสร้างอะตอมและ G band ตำแหน่งพิกัดที่ 1600 cm^{-1} แสดงถึงการจัดเรียงอะตอมอย่างเป็นระเบียบของโครงสร้างคาร์บอนหรือโครงสร้างของแกรไฟต์ อัตราส่วน (I_D/I_G) สามารถบอกถึงความผิดปกติของคาร์บอนอะตอมหรือข้อบกพร่องในโครงสร้างของแกรไฟต์ อัตราส่วน (I_D/I_G) มีค่าน้อย บ่งบอกถึงคาร์บอนได้มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ อัตราส่วน (I_D/I_G) มีค่ามาก บ่งบอกถึงคาร์บอนได้มีการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วน (I_D/I_G) ของใบปาล์มน้ำมันที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชัน ที่อุณหภูมิ 600 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 1.04 1.05 1.03 และ 0.99 ตามลำดับ ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น อัตราส่วน (I_D/I_G) ลดลง ส่งผลให้เป็นโครงสร้างที่มีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบเพิ่มขึ้น

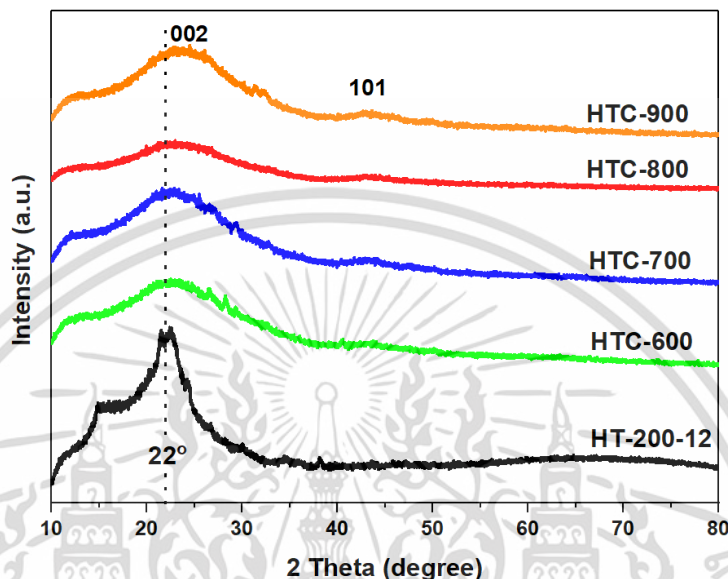


รูปที่ 4.6 กราฟ Raman spectroscopy ของไบปาล์มน้ำมันที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 12 ชั่วโมง และผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 600 (HTC-600) 700 (HTC-700) 800 (HTC-800) และ 900 (HTC-900) องศาเซลเซียส ใช้เวลา 1 ชั่วโมง ภายในบรรยากาศไนโตรเจน

4.3.3 การศึกษาความเป็นผลึกของตัวรองรับคาร์บอน

จากรูปที่ 4.7 กราฟแสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เรย์ของไบปาล์มน้ำมันที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 12 ชั่วโมง และผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 600 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน พบว่าไบปาล์มน้ำมันที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 12 ชั่วโมง มีโครงสร้างของเซลลูโลส ที่ตำแหน่งพิก 22° degree เมื่อผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชัน ที่อุณหภูมิ 600 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 1 ชั่วโมง ภายในบรรยากาศไนโตรเจน พบว่าโครงสร้างของเซลลูโลส ที่ตำแหน่งพิก 22° degree มีการสลายตัวและปรับเปลี่ยนโครงสร้างของผลึกคาร์บอนไปเป็นโครงสร้างเป็นอสัณฐานวิทยา โดยจะเห็นได้ว่าพิกกว้างที่ตำแหน่ง 19-26 (degree) มีความเป็นโครงสร้างอสัณฐานของคาร์บอนในระนาบ 002 ต่อมาพิกกว้างที่ตำแหน่ง 42-45 (degree) มีความเป็นโครงสร้างอสัณฐานของคาร์บอนในระนาบ 101 ดังนั้นคาร์บอนที่มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน ที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างของไบปาล์มน้ำมันที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไน

เซชันที่อุณหภูมิ 600-900 องศาเซลเซียส ซึ่งจะสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ Raman spectroscopy ว่าลักษณะของคาร์บอนมีการจัดว่าตัวกันไม่เป็นระเบียบหรือแบบอสัณฐานวิทยา



รูปที่ 4.7 กราฟ X-ray Diffractometer (XRD) ของไบปาล์มน้ำมันที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 12 ชั่วโมง (HT-200-12) และผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนในเซชัน ที่อุณหภูมิ 600 (HTC-600) 700 (HTC-700) 800 (HTC-800) และ 900 (HTC-900) องศาเซลเซียส ใช้เวลา 1 ชั่วโมง ภายในบรรยากาศไนโตรเจน

4.4 การศึกษากระบวนการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

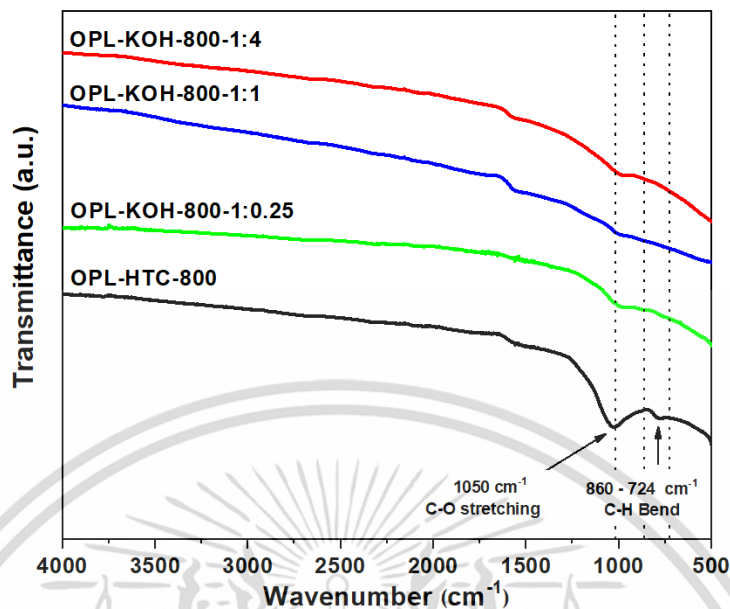
จากการศึกษาที่ 4.1 การศึกษาอุณหภูมิของกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนในเซชันเลือกเงื่อนไขที่ดีที่สุดคือ ไบปาล์มน้ำมันที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ที่เวลา 12 ชั่วโมง และการศึกษาที่ 4.3 การศึกษาอุณหภูมิของกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนในเซชันเงื่อนไขที่ดีที่สุดคือ การไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ที่เวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ขั้นตอนต่อมาศึกษากระบวนการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ศึกษาที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของคาร์บอนต่อน้ำหนัก KOH 1:0.25 1:1 และ 1:4 ผ่านกระบวนการแคลซิเนชันที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน กระบวนการนี้จะปรับปรุงโครงสร้างให้มีเป็นคาร์บอนให้เกิดรูพรุนที่อยู่ในระดับนาโนเมตรและเพิ่มพื้นที่ผิวของวัสดุ โดยศึกษาสมบัติต่างๆ ของวัสดุ เพื่อเลือกเงื่อนไขที่ดีที่สุดและเหมาะสมสำหรับเป็นตัวดูดซับต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.1 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนผิวของตัวรองรับคาร์บอนผ่านการกระตุ้นด้วย

โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

รูปที่ 4.8 กราฟ FT-IR ของไบโพลีเมอร์น้ำมันที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง (OPL-HTC-800) และกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักคาร์บอนต่อ KOH 1:0.25 1:1 และ 1:4 ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน พบว่าตำแหน่งพีกในช่วง $860-724\text{ cm}^{-1}$ คือ C-H bend ซึ่งเป็นโครงสร้างอะโรมาติก เกิดการสลายตัวไปจนหมดหลังจากกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน 1:0.25 1:1 และ 1:4 ตำแหน่งพีก 1050 cm^{-1} คือ C-O stretching ซึ่งเป็นของ C-O ของหมู่อีเทอร์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลส มีการสลายตัวไปจนหมด เมื่อกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน 1:0.25 1:1 และ 1:4 และจะเห็นได้ว่ากระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน 1:4 จะมีการสลายตัวออกไปจนใกล้หมด เนื่องจากองค์ประกอบคาร์บอนจากเฮมิเซลลูโลสและสารระเหยต่าง ๆ เช่น ไนโตรเจน ไฮโดรเจน ออกซิเจน จะถูกกำจัดออกจากโครงสร้างของคาร์บอนโดยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีอัตราส่วน 1:4 ดังนั้นจากผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของคาร์บอนที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 12 ชั่วโมง และผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน 1:4 ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด

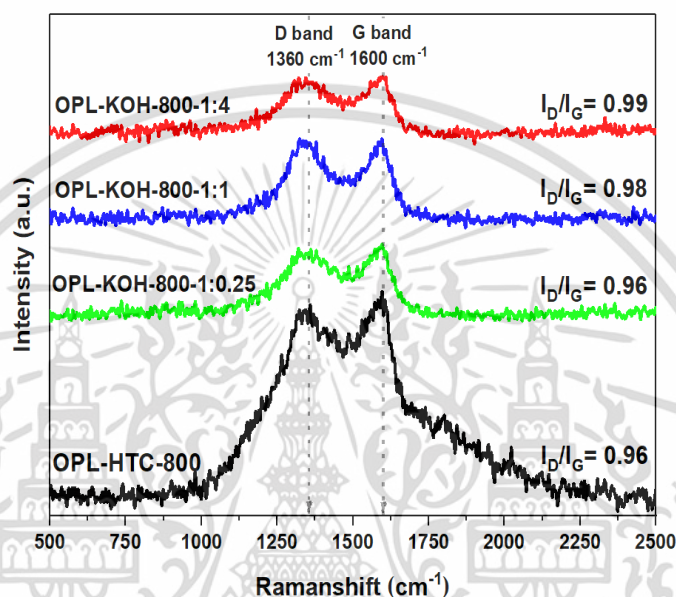


รูปที่ 4.8 กราฟ Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR) ของไบโพลีม์น้ำมันที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง (OPL-HTC-800) และกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน 1:0.25 (OPL-KOH-800-1:0.25) 1:1 (OPL-KOH-800-1:1) และ 1:4 (OPL-KOH-800-1:4) ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

4.4.2 การศึกษาความเป็นโครงสร้างอสังฐานผ่านการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

รูปที่ 4.9 กราฟ Raman spectroscopy ของไบโพลีม์น้ำมันที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชัน ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง (OPL-HTC-800) และกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของคาร์บอนต่อ KOH 1:0.25 (OPL-KOH-800-1:0.25) 1:1 (OPL-KOH-800-1:1) และ 1:4 (OPL-KOH-800-1:4) ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน แสดงให้เห็น D band ตำแหน่งพิกัด 1360 cm^{-1} แสดงถึงความผิดปกติหรือข้อบกพร่องของโครงสร้างภายในโครงสร้างอะตอม G band ตำแหน่งพิกัดที่ 1600 cm^{-1} แสดงถึงการจัดเรียงอะตอมอย่างเป็นระเบียบของโครงสร้างคาร์บอนหรือโครงสร้างแกรไฟต์ ต่อมาอัตราส่วน (I_D/I_G) สามารถบอกถึงความผิดปกติของคาร์บอนอะตอมหรือข้อบกพร่องในโครงสร้างแกรไฟต์ อัตราส่วน (I_D/I_G) มีค่าน้อย บ่งบอกถึงคาร์บอนได้มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ อัตราส่วน (I_D/I_G) มีค่ามาก บ่งบอกถึงคาร์บอนได้มีการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วน (I_D/I_G) ของไบโพลีม์ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ที่เวลา

1 ชั่วโมง และกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน 1:0.25 1:1 และ 1:4 ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน มีค่าเท่ากับ 0.96 0.96 0.98 และ 0.99 ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วนเพิ่มขึ้น ส่งผลอัตราส่วน (I_D/I_G) เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เป็นโครงสร้างที่มีการจัดเรียงตัวที่ไม่เป็นระเบียบ

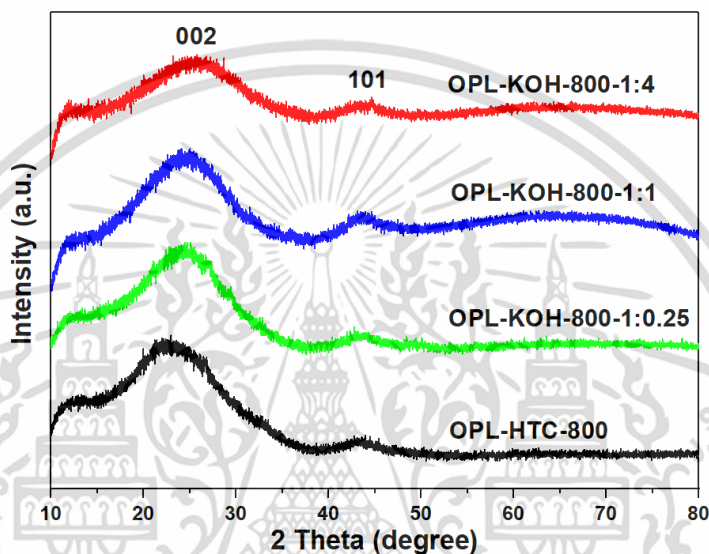


รูปที่ 4.9 กราฟ Ramam spectroscopy ของไบปาล์มน้ำมันที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง (OPL-HTC-800) และกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน 1:0.25 (OPL-KOH-800-1:0.25) 1:1 (OPL-KOH-800-1:1) และ 1:4 (OPL-KOH-800-1:4) ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

4.4.3 การศึกษาความเป็นผลึกตัวของคาร์บอนผ่านการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

รูปที่ 4.10 กราฟ XRD ของไบปาล์มน้ำมันที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง (OPL-HTC-800) และกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน 1:0.25 (OPL-KOH-800-1:0.25) 1:1 (OPL-KOH-800-1:1) และ 1:4 (OPL-KOH-800-1:4) ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน พบว่าพีคกว้างที่ตำแหน่ง 19-26 (degree) มีความเป็นโครงสร้างอสัณฐานของคาร์บอนในระนาบ 002 ต่อมาพีคกว้างที่ตำแหน่ง 42-45 (degree) มีความเป็นโครงสร้างอสัณฐานของคาร์บอนในระนาบ 101 ดังนั้นคาร์บอนที่มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน ที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างของไบปาล์มน้ำมันที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล

คาร์บอนโนเซชัน ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง และกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่อัตราส่วน 1:0.25 1:1 และ 1:4 ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ซึ่งจะสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ Raman spectroscopy ว่าลักษณะของคาร์บอนมีการจัดเรียงตัวกันไม่เป็นระเบียบหรือแบบอสัณฐานวิทยาและประกอบไปด้วยคาร์บอน sp^2 ของกราฟไฟต์และการซ้อนชั้นของกราฟีน

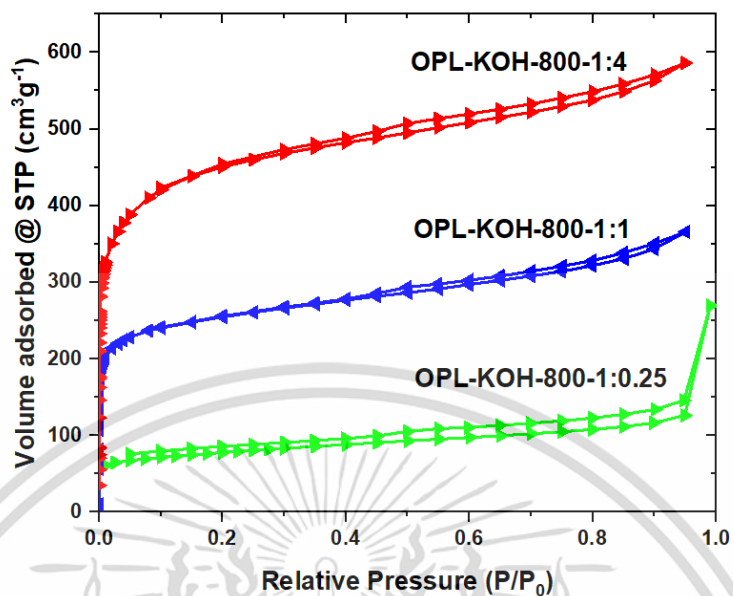


รูปที่ 4.10 กราฟ XRD ของไบโพลีเมอร์น้ำมันที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนโนเซชันที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง (OPL-HTC-800) และกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน 1:0.25 (OPL-KOH-800-1:0.25) 1:1 (OPL-KOH-800-1:1) และ 1:4 (OPL-KOH-800-1:4) ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

4.4.4 การศึกษา Nitrogen adsorption-desorption isotherm ของตัวรองรับคาร์บอนผ่านการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

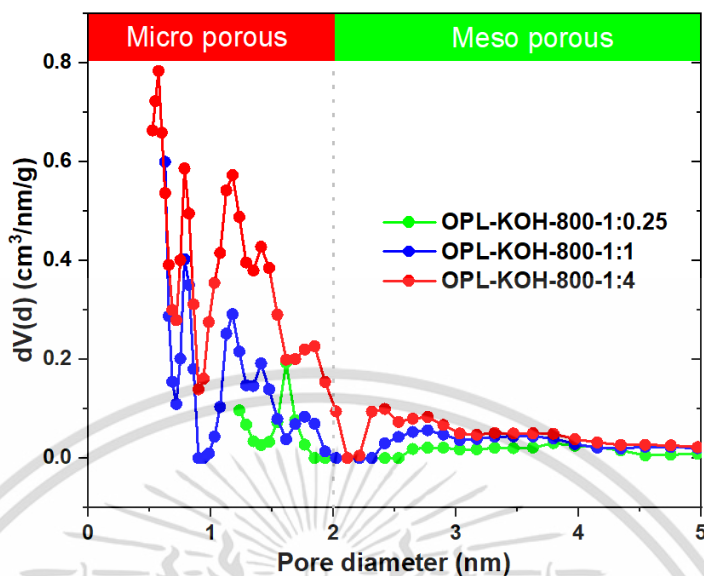
ในการตรวจสอบคุณสมบัติพื้นผิวของโครงสร้างที่มีรูพรุนในระดับนาโนเมตร โดยใช้ไอโซเทอมการดูดซับด้วยไนโตรเจน รูปที่ 4.11 Nitrogen adsorption-desorption isotherm ของไบโพลีเมอร์น้ำมันที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนโนเซชัน ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง และกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน 1:0.25 (OPL-KOH-800-1:0.25) 1:1 (OPL-KOH-800-1:1) และ 1:4 (OPL-KOH-800-1:4) ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน พบว่าไบโพลีเมอร์น้ำมันที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนโนเซชันที่อุณหภูมิ 800

องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง และกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน 1:0.25 เวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน แสดงไอโซเทอมการดูดซับประเภทที่ 4 (Type IV isotherm) ซึ่งบ่งบอกถึงการดูดซับที่เกิดขึ้นแบบเมโซพอร์รัส (Mesoporous) ขนาด 2-50 นาโนเมตร และลูอิสเทรีซิสประเภท Hysteresis 3 (แบบ H3) ตามการจัดประเภทของ IUPAC เกิดกับรูพรุนที่เกิดการรวมตัวกันของอนุภาคในลักษณะที่ทำให้เกิด Slit Shaped Pores อนุภาคที่มีรูปร่างเป็นแผ่นหรืออนุภาคที่มีมุม เช่น ลูกบาศก์ โดยมีขนาดและรูปร่างเท่ากันหมด ซึ่งเกิดจากช่องว่างระหว่างขอบรอยหยักบนพื้นผิว ในขณะเดียวกันไอโซเทอมการดูดซับด้วยไนโตรเจน ของใบปาล์มน้ำมันที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง และกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน 1:1 และ 1:4 ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน แสดงไอโซเทอมประเภทที่ 1 และ 4 (Type I/IV isotherm) เป็นแบบผสม ซึ่งเกิดจากช่องว่างระหว่างขอบรอยหยักบนพื้นผิวและรูพรุนที่เพิ่มขึ้นในระดับไมโครพอร์รัสและเมโซพอร์รัส เนื่องจากการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการทำลายเข้าไปภายในโครงสร้างพื้นผิวของคาร์บอน และทำให้เกิดพื้นผิวสูงขึ้นและโครงสร้างรูพรุนเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.11 Nitrogen adsorption-desorption isotherm ของไบโพลีเมอร์น้ำมันที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง และกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน 1:0.25 (OPL-KOH-800-1:0.25) 1:1 (OPL-KOH-800-1:1) และ 1:4 (OPL-KOH-800-1:4) ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

รูปที่ 4.12 แสดงการกระจายขนาดรูพรุนของคาร์บอนโดยใช้วิธีทฤษฎีฟังก์ชันความหนาแน่น Density Functional Theory (DFT) ของไบโพลีเมอร์น้ำมันที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชัน ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง และกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน 1:0.25 (OPL-KOH-800-1:0.25) 1:1 (OPL-KOH-800-1:1) และ 1:4 (OPL-KOH-800-1:4) ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน พบว่าหลังจากกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้นรูพรุนขนาดไมโครพอร์สเพิ่มสูงขึ้น และยังส่งผลให้รูพรุนแบบไมโคพอร์ส (<2 นาโนเมตร) ถูกขยายเป็นรูพรุนขนาดเมโซพอร์สขนาดเล็ก (2-50 นาโนเมตร) เนื่องจากการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการทำลายเข้าไปภายในโครงสร้างพื้นผิวของคาร์บอน และทำให้เกิดพื้นผิวสูงขึ้นและโครงสร้างรูพรุนในระดับไมโครพอร์สและเมโซพอร์สเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.12 แสดงการกระจายขนาดรูพรุนของคาร์บอนโดยใช้วิธีทฤษฎีฟังก์ชันความหนาแน่น Density Functional Theory (DFT) ของไบปาล์มน้ำมันที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง และกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน 1:0.25 (OPL-KOH-800-1:0.25) 1:1 (OPL-KOH-800-1:1) และ 1:4 (OPL-KOH-800-1:4) ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ Nitrogen adsorption-desorption ของคาร์บอนผ่านการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะโดยใช้วิธีการ Brunauer-Emmett-Teller (S_{BET}) ของไบปาล์มน้ำมันที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชัน ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง และกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน 1:0.25 1:1 และ 1:4 ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน พื้นที่ผิวจำเพาะ (S_{BET}) เพิ่มขึ้นเป็น 283 961 และ 1681 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ เนื่องมาจากอัตราส่วนของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้พื้นที่ผิวของคาร์บอนถูกทำลายและก่อให้เกิดสร้างโครงสร้างที่มีรูพรุนขนาดไมโครพอร์สเพิ่มมากขึ้น เมื่ออัตราส่วนเพิ่มมากขึ้นยังส่งผลให้มีการพัฒนารูพรุนจากไมโครพอร์สให้เกิดเมโซพอร์สเพิ่มมากขึ้น ต่อมาจากการวิเคราะห์ปริมาณรูพรุนของพื้นที่ผิวที่มีรูพรุนขนาดเมโซพอร์ส (Mesoporous) และมาโครพอร์ส (Macropores) ของไบปาล์มน้ำมันที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง และกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน 1:0.25 1:1 และ 1:4 ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง พื้นที่ผิวภายนอก (External surface area)

เพิ่มขึ้นจาก 126 268 และ 404 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ต่อมาไบโपाल์มน้ำมันที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง และกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน 1:0.25 1:1 และ 1:4 ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (V_{total}) เพิ่มขึ้นจาก 0.845 เป็น 0.907 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ต่อมาจากการวิเคราะห์ขนาดรูพรุนเฉลี่ย ($D_{average}$) ของพื้นที่ผิวที่มีรูพรุน พบว่าของไบโपाल์มน้ำมันที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง และกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน 1:0.25 1:1 และ 1:4 ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ขนาดรูพรุนเฉลี่ย ลดลงจาก 11.96 2.36 และ 2.15 นาโนเมตร ตามลำดับ ผลจากการศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะ การวิเคราะห์ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และการวิเคราะห์ขนาดรูพรุนเฉลี่ย แสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับที่เตรียมในงานวิจัยมีแนวโน้มที่จะใช้เป็นตัวดูดซับได้

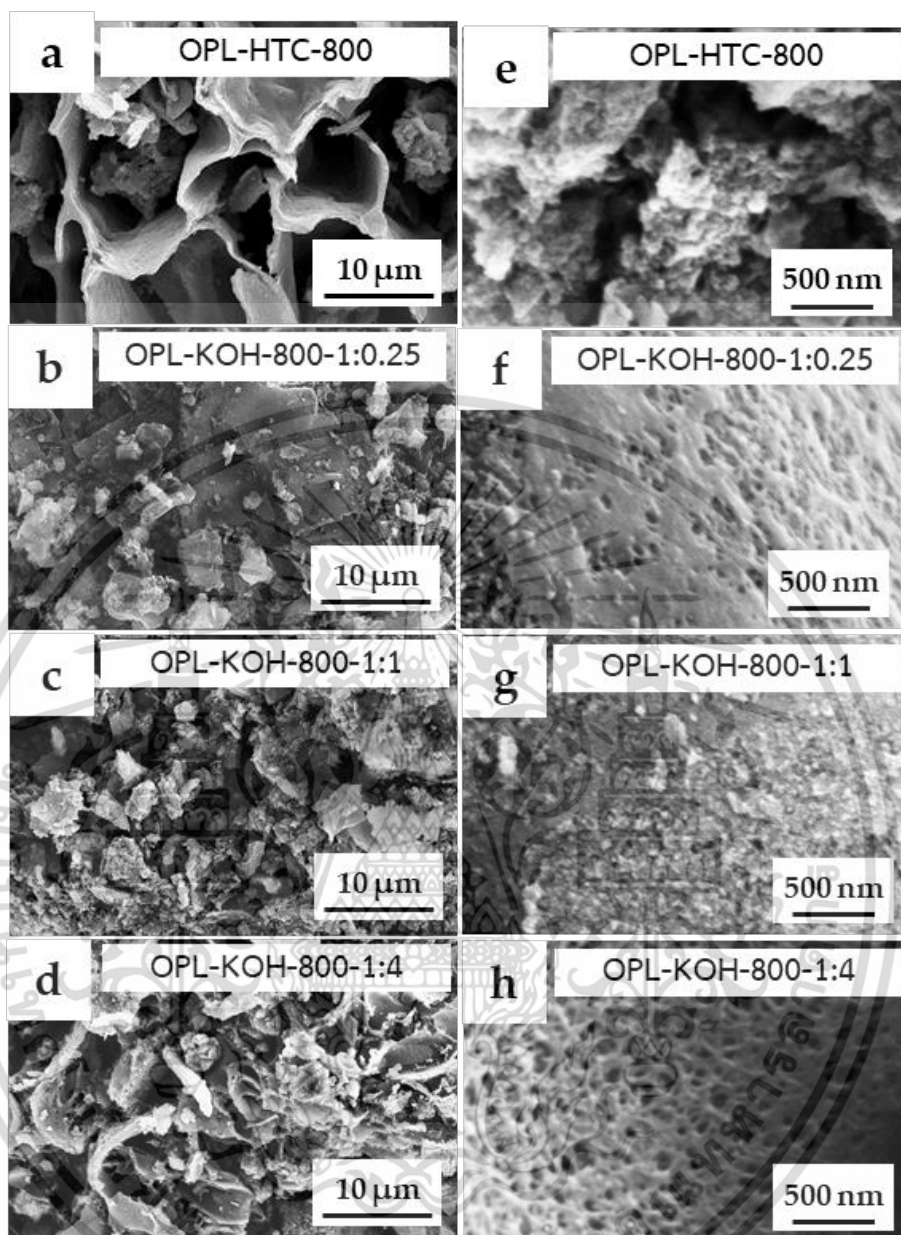
ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ Nitrogen adsorption-desorption ของคาร์บอนผ่านการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

Condition	¹ S _{BET} (m ² /g)	² Micropore surface area (m ² /g)	³ External surface area (m ² /g)	⁴ V _{total} (cm ³ /g)	⁵ D _{average} (nm)
OPL-KOH-800- 1:0.25	282	156	126	0.845	11.96
OPL-KOH-800- 1:1	960	692	268	0.566	2.36
OPL-KOH-800- 1:4	1684	1281	403	0.907	2.15

4.4.5 การศึกษาโครงสร้างสัณฐานวิทยาของตัวรองรับคาร์บอนผ่านการกระตุ้นด้วย

โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

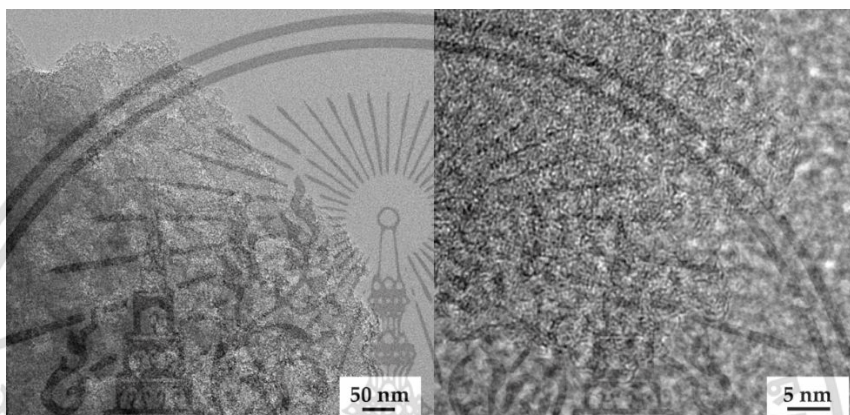
รูปที่ 4.13 ภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า (a-d) และ 150,000 เท่า (e-h) ของไบโพลีเมอร์ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชัน ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง (OPL-HTC-800) และกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน 1:0.25 (OPL-KOH-800-1:0.25) (b, f) 1:1 (OPL-KOH-800-1:1) (c, g) และ 1:4 (OPL-KOH-800-1:4) (d, h) ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน จากรูปที่ 4.13 พบว่าคาร์บอนที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้นด้วย KOH (OPL-HTC-800) มีลักษณะพื้นผิวคล้ายเป็นคลื่น เกิดรอยยับบริเวณพื้นผิวของคาร์บอน และไม่มีรูพรุนตรงข้ามกับการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วนเพิ่มมากขึ้น มีการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างที่ไม่มีรูพรุนไปเป็นโครงสร้างที่มีรูพรุน สามารถเพิ่มปริมาณรูพรุน ขยายขนาดรูพรุน ทำให้สัณฐานวิทยาคล้ายฟองน้ำและทำให้เกิดพื้นที่ผิวมากขึ้น



รูปที่ 4.13 ภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) กำลังขยาย 10,000 (a-d) และ 150,000 (e-h) เท่า ของไบโพอลิเมอร์น้ำมันที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง (OPL-HTC-800) (a, e) และกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน 1:0.25 (OPL-KOH-800-1:0.25) (b, f) 1:1 (OPL-KOH-800-1:1) (c, g) และ 1:4 (OPL-KOH-800-1:4) (d, h) ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.14 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน Field Emission Transmission Electron Microscope (FE-TEM) แสดงโครงสร้างที่มีรูพรุนระดับนาโนเมตร พื้นผิวสีดำคือพื้นผิวของคาร์บอนของ OPL-KOH-800-1:4 และจุดสีขาวคือช่องว่างรูพรุนของคาร์บอนเนื่องจากการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ส่งผลให้เกิดช่องว่างภายในของคาร์บอนและมีขนาดอยู่ในช่วงรูพรุนไมโครพอร์สและเมโซพอร์ส



รูปที่ 4.14 ภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน Field Emission Transmission Electron Microscope (FE-TEM) ของ OPL-KOH-800-1:4

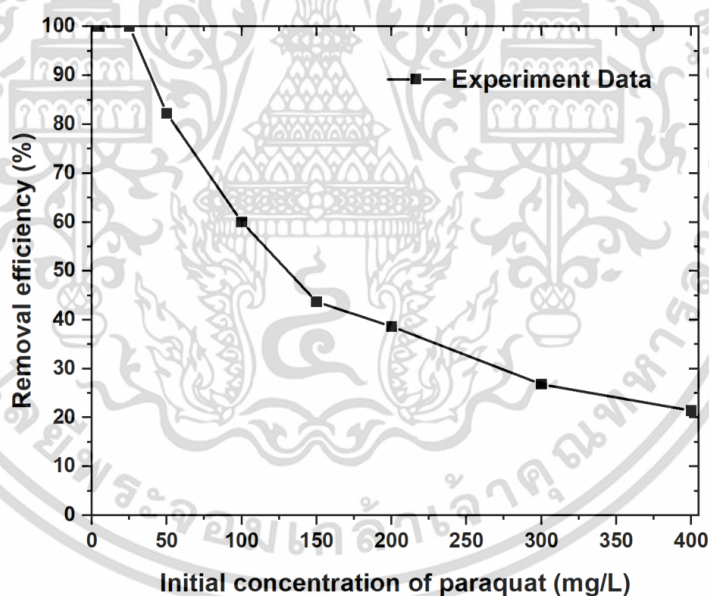
4.5 การศึกษาการดูดซับของตัวรองรับคาร์บอน

จากการศึกษา 4.4 การศึกษาไบโपाल์มน้ำมันที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชัน ร่วมกับการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่เงื่อนไขต่างๆ พบว่าเงื่อนไขที่ดีที่สุดของไบโपाल์มน้ำมัน ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง และกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน 1:4 ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน (OPL-KOH-800-1:4) เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด สำหรับนำมาทดสอบ การดูดซับพาราควอต โดยจะทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ ต่อมาทำการศึกษาไอโซเทอม การดูดซับ ได้แก่ แบบจำลองไอโซเทอมของแลงมัวร์ แบบจำลองฟรุนดลิช แบบจำลองเทมคิน และแบบจำลองโจวานิก ตามลำดับ ต่อมาทำการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ ได้แก่ แบบจำลอง การดูดซับของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม แบบจำลองการดูดซับของปฏิกิริยาอันดับสองเทียม แบบจำลอง เอโลวิช และแบบจำลองการแพร่กระจายระหว่างอนุภาค ตามลำดับ และสุดท้ายทำการศึกษากำหนด นำกลับมาใช้ใหม่ของคาร์บอนที่ผ่านการใช้แล้ว จากนั้นศึกษาสมบัติต่างๆ ของคาร์บอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.1 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับพาราควอต

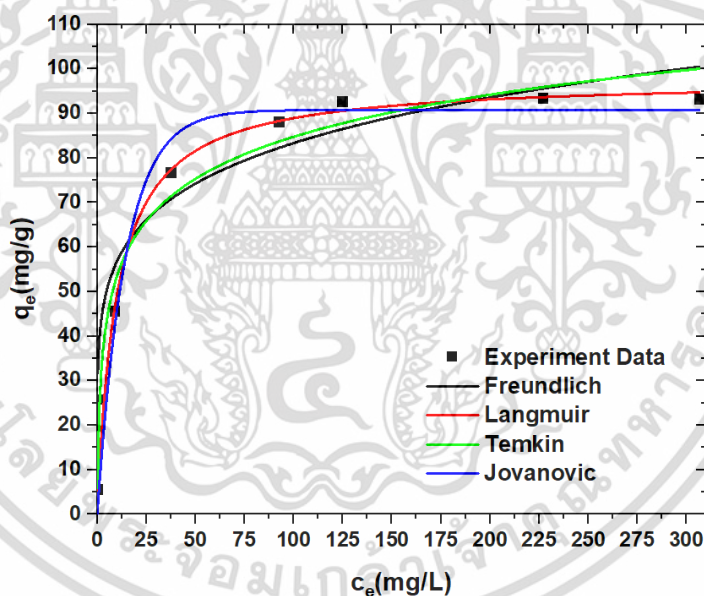
รูปที่ 4.15 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดพาราควอตของ OPL-KOH-800-1:4 โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของพาราควอตระหว่าง 5-400 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เวลา 30 นาที ปริมาณตัวดูดซับ 0.5 กรัม สารละลายพาราควอต 0.5 ลิตร ความเร็วรอบในการเขย่าเท่ากับ 250 รอบต่อนาที pH ของสารละลายเท่ากับ 7 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และใช้เครื่อง Ultraviolet – visible spectroscopy เพื่อตรวจสอบความเข้มข้นของพาราควอตที่มีความยาวคลื่น 257 นาโนเมตร พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดพาราควอตมีค่าเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้น 5-25 มิลลิกรัมต่อลิตร และประสิทธิภาพการกำจัดพาราควอตจะลดลงเหลือ 21.42 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงดังรูป 4.15 เนื่องจากช่วงแรกประสิทธิภาพในการดูดซับสามารถดูดซับได้หมด เกิดจากที่ความเข้มข้นต่ำๆ พื้นที่ผิวรองรับของคาร์บอนมีพื้นที่ผิวรองรับมากพอที่จะสามารถดูดซับพาราควอตหมด และเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น ส่งผลให้พื้นที่ผิวรองรับของคาร์บอนดูดซับพาราควอตหมดแล้ว จึงไม่สามารถดูดซับพาราควอตได้อีกส่งผลให้มีความเข้มข้นเหลืออยู่



รูปที่ 4.15 ประสิทธิภาพการกำจัดสารพาราควอตของตัวดูดซับ OPL-KOH-800-1:4 สภาวะในการดูดซับ คือ ปริมาณตัวดูดซับ 0.5 กรัม สารละลายพาราควอต 0.5 ลิตร ความเร็วรอบในการเขย่าเท่ากับ 250 รอบต่อนาที pH ของสารละลายเท่ากับ 7 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

4.5.2 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ

ในการอธิบายกลไกไอโซเทอมการดูดซับของพาราควอตด้วย OPL-KOH-800-1:4 จะใช้แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับ ได้แก่ แบบจำลองไอโซเทอมของแลงมัวร์ แบบจำลองฟรุนดลิช แบบจำลองเทมคิน และแบบจำลองโจวานอวิก ตามลำดับ ศึกษาโดยใช้ความเข้มข้นของพาราควอตเริ่มต้นถึงสมดุลระหว่าง 5-400 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เวลา 1 ชั่วโมง ปริมาณตัวดูดซับ 0.5 กรัม สารละลายพาราควอต 0.5 ลิตร ความเร็วรอบในการเขย่าเท่ากับ 250 รอบต่อนาที pH ของสารละลายเท่ากับ 7 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จากรูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของพาราควอตที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ และความเข้มข้นของพาราควอตที่เหลืออยู่ในสภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิคงที่ (C_e) พบว่าในช่วงแรกที่มีค่าความเข้มข้นต่ำ ความสามารถในการดูดซับของพาราควอต (q_e) เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจาก 5.68 ถึง 92.73 มิลลิกรัมต่อกรัม หลังจากเพิ่มความเข้มข้นของพาราควอตสูงขึ้น ความสามารถในการดูดซับของพาราควอต (q_e) มีค่าใกล้เคียงกันที่ 93 มิลลิกรัมต่อกรัม



รูปที่ 4.16 เส้นโค้งการดูดซับพาราควอตของตัวดูดซับ OPL-KOH-800-1:4 สภาวะในการดูดซับ คือ OPL-KOH-800-1:4 0.5 กรัม สารละลายพาราควอต 0.5 ลิตร ความเร็วรอบในการเขย่าเท่ากับ 250 รอบต่อนาที pH ของสารละลายเท่ากับ 7 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

ความน่าเชื่อถือของแบบจำลองต่างๆ สามารถพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ R^2 ที่มีค่าใกล้เคียงกับหนึ่งมากที่สุด จากตารางที่ 4.2 พบว่าไอโซเทอมการดูดซับที่สอดคล้องกับสมการแบบแลงเมียร์ มากกว่า แบบจำลองฟรุนดลิช แบบจำลองโจวานอวิก และแบบจำลองเทมกิน ตามลำดับ เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ มีค่าเท่ากับ 0.916 ซึ่งมีความมากกว่า 0.906 0.906 และ 0.898 ตามลำดับ แบบจำลองแลงเมียร์ สามารถอธิบายได้ว่ากระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นนั้นเป็นแบบชั้นเดียว ไม่มีการซ้อนทับกัน (Mono layer adsorption) และมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด มีค่าเท่ากับ 97.76 มิลลิกรัมต่อกรัม

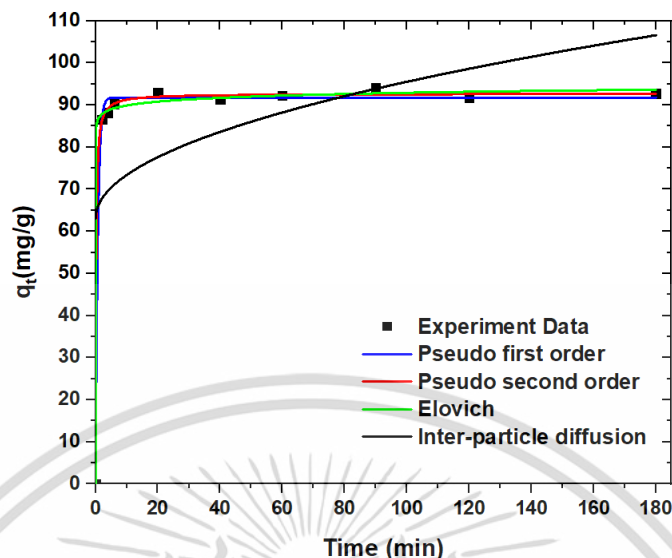
ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ของไอโซเทอมการดูดซับพาราควอตของตัวดูดซับ OPL-KOH-800-1:4 น้ำหนัก 0.5 กรัม สารละลายพาราควอต 0.5 ลิตร ความเร็วรอบในการเขย่าเท่ากับ 250 รอบต่อนาที pH ของสารละลายเท่ากับ 7 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

Model	Parameter	Paraquat
Langmuir $q_e = \frac{q_m k_L C_e}{1 + k_L C_e}$	q_m ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	97.755 ± 7.058
	k_L ($\text{L} \cdot \text{mg}^{-1}$)	0.100 ± 0.047
	R^2	0.916
Freundlich $q_e = k_F C_e^n$	k_F	38.615 ± 7.532
	n	5.986 ± 0.039
	R^2	0.906
Temkin $q_e = B \ln K_T + B \ln C_e$; $B = \frac{RT}{b}$	B	13.621 ± 4.082
	K_T	5.034 ± 9.253
	R^2	0.898
Jovanovic $q_e = q_m (1 - \exp^{-kjC_e})$	q_m	90.764 ± 5.572
	k	0.069 ± 0.025
	R^2	0.906

หมายเหตุ: T(K) คืออุณหภูมิในหน่วยเคลวิน R คือค่าคงที่ของแก๊สในอุดมคติ ($8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) K_L k_F n B K_T k และ b เป็นค่าคงที่สำหรับสูตรที่เกี่ยวข้อง ตามลำดับ

4.5.3 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ

ในการอธิบายกลไกจลนพลศาสตร์การดูดซับของพาราควอตด้วยไบโपाल์มน้ำมันที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง และกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน 1:4 ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน จะใช้แบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ ได้แก่ แบบจำลองการดูดซับของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม แบบจำลองการดูดซับของปฏิกิริยาอันดับสองเทียม แบบจำลองเอโลวิช และแบบจำลองการแพร่กระจายระหว่างอนุภาค ตามลำดับ ได้ถูกนำมาศึกษาโดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของพาราควอต 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เวลา 0-180 นาที ปริมาณตัวดูดซับ 0.5 กรัม สารละลายพาราควอต 0.5 ลิตร ความเร็วรอบในการเขย่าเท่ากับ 250 รอบต่อนาที pH ของสารละลายเท่ากับ 7 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นำข้อมูลที่ได้มาศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับโดยหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของพาราควอตที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับและที่เวลาใดๆ ณ อุณหภูมิคงที่ ซึ่งความน่าเชื่อถือของแบบจำลองต่างๆ สามารถพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ R^2 ที่มีค่าใกล้เคียงกับหนึ่งมากที่สุด พบว่าในช่วงแรก ที่เวลา 0 ถึง 6 นาที ความสามารถในการดูดซับของพาราควอต ณ เวลาใดๆ (q_t) เพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 90.29 มิลลิกรัมต่อกรัม หลังจากเพิ่มเวลา 6 ถึง 180 นาที ความสามารถในการดูดซับของพาราควอต ณ เวลาใดๆ (q_t) เพิ่มขึ้นจาก 90.29 ถึง 92.73 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อเวลาเพิ่มเวลา 6 ถึง 180 นาที และพบว่า 180 นาที ความสามารถในการดูดซับของพาราควอต ณ เวลาใด (q_t) มีค่าใกล้เคียงกันที่ 92 มิลลิกรัมต่อกรัม แสดงดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 เส้นโค้งจลนพลศาสตร์การดูดซับพาราควอตของตัวดูดซับ OPL-KOH-800-1:4 สภาวะในการดูดซับ คือ OPL-KOH-800-1:4 0.5 กรัม สารละลายพาราควอต 0.5 ลิตร ความเร็วรอบในการเขย่าเท่ากับ 250 รอบต่อนาที pH ของสารละลายเท่ากับ 7 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

จากตารางที่ 4.3 พบว่าจลนพลศาสตร์การดูดซับที่สอดคล้องกับสมการแบบจำลองการดูดซับของปฏิกิริยาอันดับสองเทียม มากกว่า แบบจำลองเอโลวิช แบบจำลองการดูดซับของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม และแบบจำลองการแพร่กระจายระหว่างอนุภาค ตามลำดับ เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของจลนพลศาสตร์การดูดซับแบบจำลองการดูดซับของปฏิกิริยาอันดับสองเทียม มีค่าเท่ากับ 0.999 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.998 0.997 และ 0.254 ตามลำดับ แบบจำลองการดูดซับของปฏิกิริยาอันดับสองเทียมสามารถอธิบายได้ว่ากลไกการดูดซับที่เกิดขึ้นจากพาราควอตเกิดจากอันตรกิริยาทางเคมีฟิสิกส์ (Phisico-chemical interaction) และค่า k_2 ของพาราควอตที่ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าเท่ากับ 0.069 ± 0.010 นาทีต่อมิลลิกรัมต่อกรัม

ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์จลนพลศาสตร์ของการดูดซับพาราควอตของตัวดูดซับ OPL-KOH-800-1:4 น้ำหนัก 0.5 กรัม สารละลายพาราควอต 0.5 ลิตร ความเร็วรอบในการเขย่าเท่ากับ 250 รอบต่อนาที pH ของสารละลายเท่ากับ 7 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

Model	Parameter	Paraquat
Pseudo first order $q_t = q_e (1 - e^{-k_1 t})$	$k_1 (\text{min}^{-1})$	1.397 ± 0.153
	$q_e (\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	91.774 ± 0.581
	R^2	0.997
Pseudo second order $q_t = \frac{q_e^2 k_2 t}{q_e k_2 t + 1}$	$k_2 (\text{min} \cdot \text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	0.069 ± 0.010
	$q_e (\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	92.673 ± 0.374
	R^2	0.999
Elovich $q_t = \frac{1}{\beta} \ln(1 + \alpha \beta t)$	α	$4.343 \times 10^{29} \pm 6.465 \times 10^{30}$
	β	0.781 ± 0.166
	R^2	0.998
Inter-particle diffusion $q_t = k_{\text{diff}} t^{1/2} + c$	$k_{\text{diff}} (\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1/2})$	3.236 ± 1.959
	$c (\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	63.143 ± 14.155
	R^2	0.254

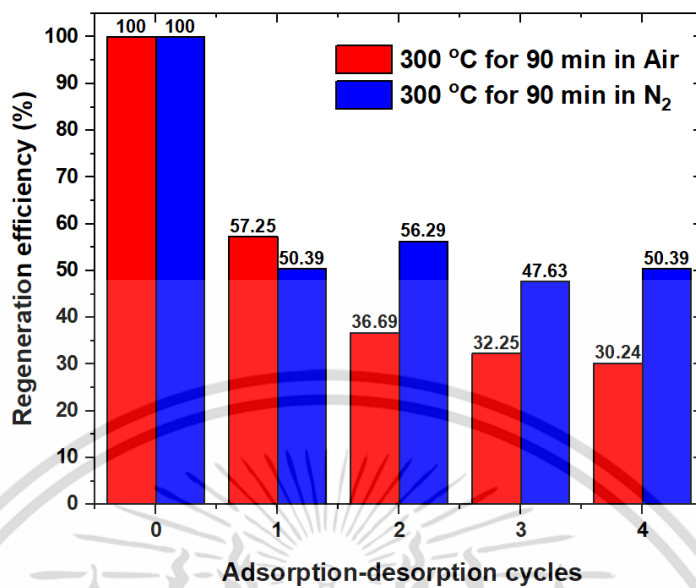
หมายเหตุ: k_1 k_2 α β k_{diff} และ c เป็นค่าคงที่สำหรับสูตรที่เกี่ยวข้อง ตามลำดับ

4.6 การศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ของตัวดูดซับคาร์บอนที่ผ่านการใช้แล้ว

ในการศึกษาความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ของตัวดูดซับ OPL-KOH-800-1:4 ที่ผ่านการใช้งานมีความสำคัญต่อการใช้งานจริง เนื่องจากช่วยลดต้นทุน โดยคาร์บอนที่ผ่านการใช้งาน มีวิธีการนำกลับมาใช้ใหม่ โดยกระบวนการไพโรไลซิส ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที ภายใต้บรรยากาศของออกซิเจนและไนโตรเจน หลังจากนั้นศึกษาสมบัติต่างๆ ของวัสดุหลังใช้งานการดูดซับ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกลับมาใช้ในการดูดซับใหม่ต่อไป

4.6.1 การศึกษาประสิทธิภาพการนำกลับมาใช้ใหม่ของตัวดูดซับคาร์บอนที่ผ่านการดูดซับพาราควอต

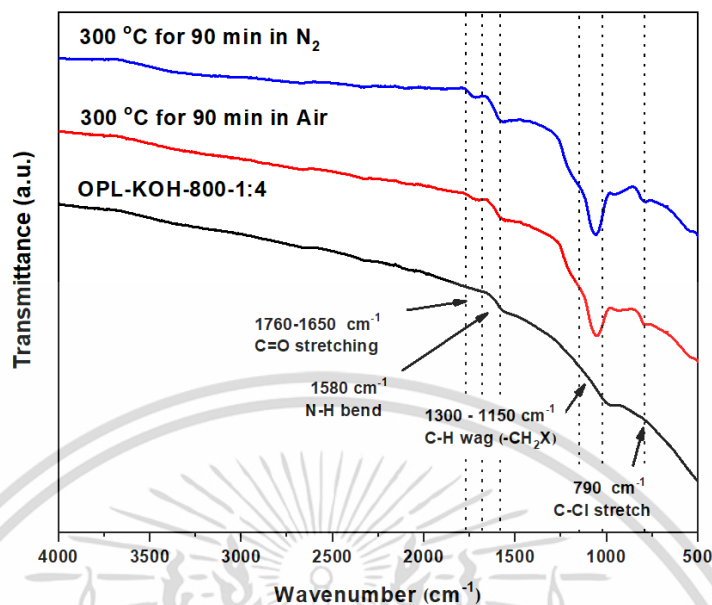
การศึกษาประสิทธิภาพการนำกลับมาใช้ใหม่ของตัวดูดซับ OPL-KOH-800-1:4 ที่ผ่านการดูดซับพาราควอตจะทำการทดสอบการดูดซับ โดยใช้ความเข้มข้นของพาราควอต 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เวลา 10 นาที ปริมาณตัวดูดซับ 0.5 กรัม สารละลายพาราควอต 0.5 ลิตร ความเร็วรอบในการเขย่าเท่ากับ 250 รอบต่อนาที pH ของสารละลายเท่ากับ 7 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส หลังจากทำการดูดซับ จะใช้กระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่โดย นำตัวดูดซับ OPL-KOH-800-1:4 มาล้างด้วยน้ำ DI จากนั้น นำตัวดูดซับ OPL-KOH-800-1:4 ที่ผ่านการดูดซับไปอบ เพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นเนื่องจากพาราควอตมีจุดเดือดที่ 300 องศาเซลเซียส จึงทำกระบวนการไพโรไลซิส ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที ภายใต้บรรยากาศออกซิเจนและไนโตรเจน และเพื่อเปรียบเทียบกระบวนการไพโรไลซิส ภายใต้บรรยากาศที่ต่างกัน จากนั้นนำไปทดลองการดูดซับรอบต่อไป ที่สภาวะเดียวกันกับตอนแรก ทำกระบวนการดังกล่าวข้างต้นซ้ำ 4 ครั้ง โดยอ้างอิงจากตัวดูดซับ OPL-KOH-800-1:4 ที่ยังไม่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิส สามารถดูดซับได้ 100 เปอร์เซ็นต์ ที่เข้าสู่สภาวะสมดุลการดูดซับและมีความเข้มข้นเหลืออยู่ 65 มิลลิกรัมต่อลิตร จากผลการทดลองพบว่าตัวดูดซับ OPL-KOH-800-1:4 ที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิส ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ในครั้งที่ 1 ถึง 4 มีความสามารถในการดูดซับลดลง 50.39 ถึง 47.63 เปอร์เซ็นต์ ในกระบวนการไพโรไลซิส ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน โครงสร้างของคาร์บอนมีการพังทลายน้อยกว่าภายใต้บรรยากาศออกซิเจน เนื่องจากไม่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และมีบางตำแหน่งภายในโครงสร้างของตัวดูดซับที่ไม่ได้โดนดูดซับ จึงทำให้มีการดูดซับที่คงที่ และตัวดูดซับ OPL-KOH-800-1:4 ที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิส ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน ในครั้งที่ 1 ถึง 4 มีความสามารถในการดูดซับค่อยๆ ลดลงจาก 57.25 เป็น 30.24 เปอร์เซ็นต์ ในกระบวนการไพโรไลซิส ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน ในสภาวะการเผาไหม้ ออกซิเจน จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้เกิดการพังทลายของโครงสร้างของคาร์บอนที่รูพรุน ทำให้เกิดการดูดซับมีค่าลดลง แสดงดังรูป 4.18 แสดงให้เห็นว่ากระบวนการไพโรไลซิส ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน เป็นกระบวนการที่สามารถนำตัวดูดซับ OPL-KOH-800-1:4 กลับมาใช้ใหม่ได้และ แต่มีประสิทธิภาพในการดูดซับลดลงครั้งหนึ่ง



รูปที่ 4.18 ประสิทธิภาพการนำกลับมาใช้ใหม่ของตัวดูดซับ OPL-KOH-800-1:4 ที่ผ่านการดูดซับพาราควอต หลังจากใช้งานการดูดซับ-การคายซับ 4 ครั้ง สภาวะในการดูดซับ คือ ความเข้มข้นพาราควอต เริ่มต้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร OPL-KOH-800-1:4 0.5 กรัม สารละลายพาราควอต 0.5 ลิตร ความเร็วรอบในการเขย่าเท่ากับ 250 รอบต่อนาที pH ของสารละลายเท่ากับ 7 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

4.6.2 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนผิวของตัวรองรับคาร์บอนที่ผ่านการดูดซับพาราควอต

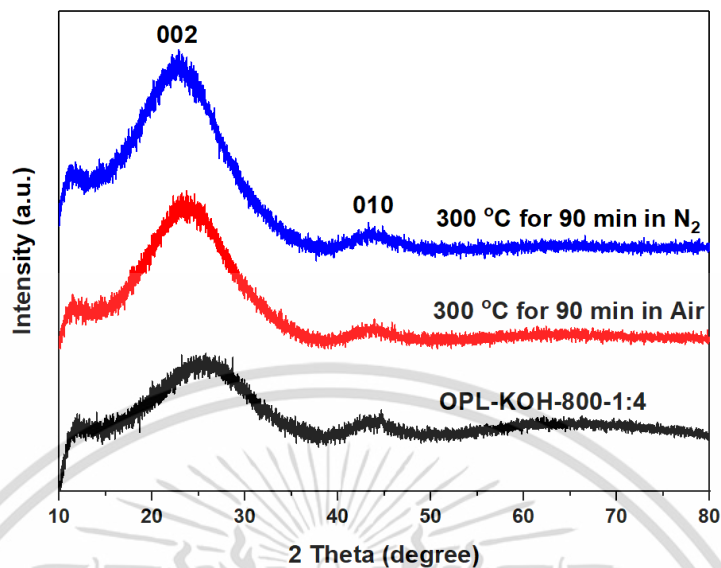
จากรูปที่ 4.19 กราฟ FT-IR ของตัวดูดซับ OPL-KOH-800-1:4 ที่ผ่านการดูดซับพาราควอต หลังจากใช้งานการดูดซับ-การคายซับ 4 ครั้ง แสดงให้เห็นว่าตำแหน่งพีก $1,700-1,580\text{ cm}^{-1}$ คือ C=O bonds ซึ่งอยู่ในกลุ่มคาร์บอกซิลิก (-COOH) และ C-C bonds ของวงอะโรมาติกของคาร์บอน เนื่องจากการกระบวนการไพโรไลซิส ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างให้มารวมกันเป็นวงอะโรมาติกของคาร์บอน ในขณะที่ตำแหน่งพีก N-H bend (1580 cm^{-1}) คือ 1° amines ตำแหน่งพีกระหว่าง $1300-1150\text{ cm}^{-1}$ คือ C-H wag ($-\text{CH}_2\text{X}$) และตำแหน่งพีก 790 cm^{-1} คือ C-Cl ของอัลคิลเฮไลด์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของพาราควอตและผลการตรวจสอบบ่งบอกว่าพาราควอตถูกดูดซับบนพื้นผิวคาร์บอนและภายในรูพรุน และกระบวนการไพโรไลซิส อาจสร้างความเสียหายให้กับคาร์บอน ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับพาราควอตลดลงหลังจากการทดสอบการดูดซับ-การคายซับ 4 ครั้ง



รูปที่ 4.19 กราฟ FT-IR ของตัวดูดซับ OPL-KOH-800-1:4 ที่ผ่านการดูดซับพาราควอต หลังจากการดูดซับ-การคายซับ 4 ครั้ง

4.6.3 การศึกษาความเป็นผลึกของตัวรองรับคาร์บอนที่ผ่านการดูดซับพาราควอต

รูปที่ 4.20 กราฟ XRD ของตัวดูดซับ OPL-KOH-800-1:4 ที่ผ่านการดูดซับพาราควอต หลังจากการดูดซับ-การคายซับ 4 ครั้ง พบว่าพีคกว้างที่ตำแหน่ง 19-26 (degree) มีความเป็นโครงสร้างอสังฐานของคาร์บอนในระนาบ 002 มีค่าเพิ่มขึ้น หลักจากผ่านการดูดซับ-การคายซับ เนื่องจากการกระบวนการไพโรไลซิส ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างให้มีความเป็นผลึกสูงขึ้น ต่อมาพีคกว้างที่ตำแหน่ง 42-45 (degree) มีความเป็นโครงสร้างอสังฐานของคาร์บอนในระนาบ 101 ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงตั้งนั้นหลังจากกระบวนการไพโรไลซิสและกระบวนการดูดซับ-การคายซับ คาร์บอนได้ยังคงรักษาโครงสร้างอสังฐานไม่ก่อให้เกิดผลึกระหว่างคาร์บอนและพาราควอต



รูปที่ 4.20 กราฟ XRD ของตัวดูดซับ OPL-KOH-800-1:4 ที่ผ่านการดูดซับพาราควอต
หลังจากการดูดซับ-การคายซับ 4 ครั้ง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมไบโพลีเมอร์น้ำมันผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชัน ร่วมกับการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์สำหรับดูดซับพาราควอต แบ่งการดำเนินงานเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกคือ การเตรียมไบโพลีเมอร์น้ำมันที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชัน ร่วมกับการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่เงื่อนไขต่างๆ และขั้นตอนที่สองคือ การดูดซับของตัวดูดซับ คาร์บอนและการนำกลับมาใช้ใหม่

ขั้นตอนแรกจากการทดลองศึกษาการเตรียมไบโพลีเมอร์น้ำมันที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่ 200 องศาเซลเซียส และเวลา 12 ชั่วโมง กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน และการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน 1:4 เวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน เป็นตัวดูดซับที่ดีที่สุด จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนผิว องค์ประกอบธาตุ เอมิเซลลูโลสและสารระเหยต่าง ๆ จะถูกกำจัดออกจากโครงสร้างของคาร์บอน ความเป็นโครงสร้างอสัณฐานและความเป็นผลึก มีการจัดเรียงตัวกันไม่เป็นระเบียบ ประกอบไปด้วยคาร์บอน sp^2 ของกราฟไฟต์และการซ้อนชั้นของกราฟีน พื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุดถึง 1681 ตารางเมตรต่อกรัม ไอโซเทอมประเภทที่ 1 และ 4 (Type I/IV isotherm) เป็นแบบผสม และลูปฮิสเทรีซิส ประเภท Hysteresis 3 (แบบ H3) ตามการจัดประเภทของ IUPAC เกิดจากช่องว่างระหว่างขอบรอยหยักบนพื้นผิวและรูพรุนในระดับไมโครพอร์สและเมโซพอร์ส ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด 0.907 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ขนาดรูพรุนเฉลี่ย 2.15 นาโนเมตร

ขั้นตอนที่สองศึกษาการดูดซับพาราควอต ด้วยตัวดูดซับไบโพลีเมอร์น้ำมันที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่ 200 องศาเซลเซียส และเวลา 12 ชั่วโมง กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน และการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน 1:4 เวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน เป็นการทดลองแบบกะ ใช้ตัวดูดซับ 0.5 กรัม ในสารละลายซึ่งมีความเข้มข้นเริ่มต้นของพาราควอต 5 25 50 100 150 200 300 และ 400 ppm ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เวลา 2 4 6 20 40 60 90 120 และ 180 นาที จากผลการทดลองพบว่า ที่ความเข้มข้นของพาราควอตที่ 400 มิลลิกรัมต่อกรัม เป็นเวลา 10 นาที ประสิทธิภาพสูงสุดการดูดซับ เท่ากับ 79 เปอร์เซ็นต์ ต่อมาผล

การศึกษาสมการไอโซเทอมการดูดซับ แบบจำลองไอโซเทอมของแลงมัวร์ แบบจำลองฟรุนดลิช แบบจำลองเทมคิน และแบบจำลองโจวานโนวิก พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) มีค่าเท่ากับ 0.916 0.906 0.898 และ 0.906 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ คือกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นแบบชั้นเดียว ไม่มีการซ้อนทับกัน (Mono layer adsorption) และมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด มีค่าเท่ากับ 97.76 มิลลิกรัมต่อกรัม จากนั้นศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ แบบจำลองการดูดซับของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม แบบจำลองการดูดซับของปฏิกิริยาอันดับสองเทียม แบบจำลองเอโลวิช และ แบบจำลองการแพร่กระจายระหว่างอนุภาค พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) มีค่าเท่ากับ 0.997 0.999 0.998 และ 0.254 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับของปฏิกิริยาอันดับสองเทียม คือกลไกการดูดซับที่เกิดขึ้นจากพาราควอตเกิดจากอันตรกิริยาทางเคมีฟิสิกส์ (Phisico-chemical interaction) ความสามารถในการดูดซับของพาราควอต ณ เวลาใด มีค่าเท่ากับ 92 มิลลิกรัมต่อกรัม การศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ของตัวดูดซับ พบว่ากระบวนการไพโรไลซิส ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เวลา 3 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน มีความสามารถในการดูดซับระหว่าง 50.39 ถึง 47.63 เปอร์เซ็นต์ ในการนำกลับมาใช้ใหม่ ครั้งที่ 4 โดยประสิทธิภาพลดลงครึ่งหนึ่งแต่ยังสามารถใช้งานดูดซับได้

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล	นายศิริราย จันปี่
วัน เดือน ปีเกิด	21 มิถุนายน 2540
ที่อยู่	58/1 ม.1 ต.บ้านท่าเนียน อ.ศิริรัฐนิคม จ.สุราษฎร์ธานี
E-mail	63601259@kmitl.ac.th
ประวัติการศึกษา	ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนกาญจนาภิเษก วิทยาลัยสุราษฎร์ธานี จังหวัดสุราษฎร์ธานี ระดับปริญญาตรี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง คณะวิทยาลัยเทคโนโลยีและนวัตกรรมวัสดุ

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] **Sirayu Chanpee**, Nattaya Suksai, Napat Kaewtrakulchai, Sutee Chutipaijit, Masayoshi Fuji, and Apiluck Eiad-ua, Nanoporous carbon from water hyacinth via hydrothermal carbonization, AIP conference Proceedings. (Submitted)
- [2] **Sirayu Chanpee**, Nattaya Suksai, Napat Kaewtrakulchai, Sutee Chutipaijit, Masayoshi Fuji, and Apiluck Eiad-ua, Highly Porous Carbon Materials for Adsorbent from Water Hyacinth via Hydrothermal Carbonization, Material Today Proceeding. (Submitted)
- [3] Nattaya Suksai, **Sirayu Chanpee**, Napat Kaewtrakulchai, Sutee Chutipaijit, Masayoshi Fuji, and Apiluck Eiad-ua, Synthesis of Nanoporous Carbon from Water Hyacinth via Hydrothermal Carbonization Process Assisted Acid Activation, International journal of medical science and education. (Submitted)
- [4] **Sirayu Chanpee**, Napat Kaewtrakulchai, Narathon Khemasiri, Apiluck Eiad-ua and Pornsawan Assawasaengrat, Nanoporous Carbon from Oil Palm Leaves via Hydrothermal Carbonization assisted KOH activation for Paraquat Removal, Molecules. (Accepted)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลงานที่ได้นำเสนอในที่ประชุมวิชาการ

- [1] **Sirayu Chanpee**, Nattaya Suksai, Napat Kaewtrakulchai, Sutee Chutipaijit, Masayoshi Fuji, and Apiluck Eiad-ua, Nanoporous carbon from water hyacinth via hydrothermal carbonization, The 3rd International Conference on Materials Engineering and Applications (ICMEA 2020), January 6-8, 2020, Ho chi minh, Vietnam. (Oral Presentation)
- [2] **Sirayu Chanpee**, Nattaya Suksai, Napat Kaewtrakulchai, Sutee Chutipaijit, Masayoshi Fuji, and Apiluck Eiad-ua, Highly Porous Carbon Materials for Adsorbent from Water Hyacinth via Hydrothermal Carbonization, The 2nd Materials Research Society of Thailand International Conference (MRS-Thailand 2019), July 10 - 12, 2019, The Zign Hotel, Pattaya, Thailand (Poster Presentation)
- [3] Nattaya Suksai, **Sirayu Chanpee**, Napat Kaewtrakulchai, Sutee Chutipaijit, Masayoshi Fuji, and Apiluck Eiad-ua, Synthesis of Nanoporous Carbon from Water Hyacinth via Hydrothermal Carbonization Process Assisted Acid Activation, The 2nd International Conference on Advances in Materials, Mechanical and Manufacturing (AMMM 2020), March 27-29, 2020, Singapore. (Oral Presentation)
- [4] **Sirayu Chanpee**, Napat Kaewtrakulchai, Narathon Khemasiri, Apiluck Eiad-ua and Pornsawan Assawasaengrat, Nanoporous carbon from oil palm leaves via hydrothermal carbonization for adsorbent, The 18th International Symposium on Biocontrol and Biotechnology (ISBB2022) “Biocontrol and Biotechnology for Sustainable Development Goals” June 16-17, 2022. (Oral Presentation)
- [5] Atipong Paikamnam, Weerawat Clowutimon, Narathon Khemasiri, **Sirayu Chanpee**, Pongsert Sriprom, and Pornsawan Assawasaengrat, Production of empty palm bunch biochar using microwave-assisted pyrolysis at low temperature, THE 7TH

INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING, APPLIED SCIENCES AND TECHNOLOGY: (ICEAST2021)

- [6] Naruemon Apinyakul **Sirayu Chanpee**, Napat Kaewtrakulchai, Sutee Chutipaijit, Masayoshi Fuji, and Apiluck Eiad-ua, Eco-friendly preparation of biomass derived nanoporous carbon via hydrothermal carbonization, THE 4TH materials Research Society of Thailand International Conference, February 28th – March 4th, 2023 (Poster presentation)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

1. Al-Awadi AS, El-Harbawi M, Algarawi A, Alalawi A, blidi LE, Alrashed MM, et al. (2022). Synthesis of carbon microspheres via hydrothermal carbonization of Sabal palms (Sabal palmetto) biomass for adsorption of methylene blue. *Biomass Conversion and Biorefinery*.
2. Hammud HH, Karnati RK, Al Shafee M, Fawaz Y, Holail H. (2019). Activated hydrochar from palm leaves as efficient lead adsorbent. *Chemical Engineering Communications*,208(2), 197-209.
3. Ge S, Wu Y, Peng W, Xia C, Mei C, Cai L, et al. (2020). High-pressure CO₂ hydrothermal pretreatment of peanut shells for enzymatic hydrolysis conversion into glucose. *Chemical Engineering Journal*,385.
4. Ameen M, Zamri NM, May ST, Azizan MT, Aqsha A, Sabzoi N, et al. (2021). Effect of acid catalysts on hydrothermal carbonization of Malaysian oil palm residues (leaves, fronds, and shells) for hydrochar production. *Biomass Conversion and Biorefinery*,12(1), 103-14.
5. Villabona-Ortíz A, González-Delgado Á, Tejada-Tovar C. (2022). Equilibrium, Kinetics and Thermodynamics of Chromium (VI) Adsorption on Inert Biomasses of Dioscorea rotundata and Elaeis guineensis. *Water*,14(6).
6. Villamil JA, Diaz E, de la Rubia MA, A FM. (2020). Potential Use of Waste Activated Sludge Hydrothermally Treated as a Renewable Fuel or Activated Carbon Precursor. *Molecules*,25(15).
7. Pfersich J, Arauzo PJ, Lucian M, Modugno P, Titirici MM, Fiori L, et al. (2020). Hydrothermal Conversion of Spent Sugar Beets into High-Value Platform Molecules. *Molecules*,25(17).
8. Xia L, Li X, Zhang Y, Zhou K, Yuan L, Shi R, et al. (2022). Sustainable and Green Synthesis of Waste-Biomass-Derived Carbon Dots for Parallel and Semi-Quantitative Visual Detection of Cr(VI) and Fe(3). *Molecules*,27(4).

9. Alcaniz-Monge J, Roman-Martinez MDC, Lillo-Rodenas MA. (2022). Chemical Activation of Lignocellulosic Precursors and Residues: What Else to Consider? *Molecules*,27(5).
10. Qu X, Kang W, Lai C, Zhang C, Hong SW. (2022). A Simple Route to Produce Highly Efficient Porous Carbons Recycled from Tea Waste for High-Performance Symmetric Supercapacitor Electrodes. *Molecules*,27(3).
11. Fregolente LG, Dos Santos JV, Vinci G, Piccolo A, Moreira AB, Ferreira OP, et al. (2021). Insights on Molecular Characteristics of Hydrochars by ¹³C-NMR and Off-Line TMAH-GC/MS and Assessment of Their Potential Use as Plant Growth Promoters. *Molecules*,26(4).
12. Wei Y, Chen W, Liu C, Wang H. (2021). Facial Synthesis of Adsorbent from Hemicelluloses for Cr(VI) Adsorption. *Molecules*,26(5).
13. Li H, Miao Q, Chen Y, Yin M, Qi H, Yang M, et al. (2020). Modified carbon spheres as universal materials for adsorption of cationic harmful substances (paraquat and dyes) in water. *Microporous and Mesoporous Materials*,297.
14. Li H, Qi H, Yin M, Chen Y, Deng Q, Wang S. (2021). Carbon tubes from biomass with prominent adsorption performance for paraquat. *Chemosphere*,262, 127797.
15. Mueanpun N, Srisuk N, Chaiammart N, Panomsuwan G. (2021). Nanoporous activated carbons derived from water ferns as an adsorbent for removal of paraquat from contaminated water. *Materialia*,15.
16. Nicosia A, Vento F, Di Mari GM, D'Urso L, Mineo PG. (2021). TiO₂-Based Nanocomposites Thin Film Having Boosted Photocatalytic Activity for Xenobiotics Water Pollution Remediation. *Nanomaterials (Basel)*,11(2).
17. Tongur T, Ayranci E. (2021). Adsorption and electrosorption of paraquat, diquat and difenzoquat from aqueous solutions onto activated carbon cloth as monitored by in-situ uv-visible spectroscopy. *Journal of Environmental Chemical Engineering*,9(4).
18. Lenzi GG, Freitas P, Fidelis MZ, Ribeiro MA, Brackmann R, Colpini LMS, et al. (2021). Paraquat degradation by photocatalysis: experimental desing and optimization. *J Environ Sci Health B*,56(6), 523-31.

19. Phuintiang P, Kajitvichyanukul P. (2019). Degradation of paraquat from contaminated water using green TiO₂ nanoparticles synthesized from *Coffea arabica* L. in photocatalytic process. *Water Sci Technol*,79(5), 905-10.
20. Fernandes T, Soares SF, Trindade T, Daniel-da-Silva AL. (2017). Magnetic Hybrid Nanosorbents for the Uptake of Paraquat from Water. *Nanomaterials (Basel)*,7(3).
21. Zbair M, Anfar Z, Ait Ahsaine H, Khallok H. (2019). Kinetics, equilibrium, statistical surface modeling and cost analysis of paraquat removal from aqueous solution using carbonated jujube seed. *RSC Advances*,9(2), 1084-94.
22. Jaroenkietkajorn U, Gheewala SH, Scherer L. (2021). Species loss from land use of oil palm plantations in Thailand. *Ecological Indicators*,133.
23. Brar JS, Singh K, Wang J, Kumar S. (2012). Cogasification of Coal and Biomass: A Review. *International Journal of Forestry Research*,2012, 1-10.
24. Brodeur G, Yau E, Badal K, Collier J, Ramachandran KB, Ramakrishnan S. (2011). Chemical and physicochemical pretreatment of lignocellulosic biomass: a review. *Enzyme Res*,2011, 787532.
25. Vassilev SV, Baxter D, Andersen LK, Vassileva CG. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*,89(5), 913-33.
26. Parmar K. (2017). Biomass- An Overview on Composition Characteristics and Properties. *IRA-International Journal of Applied Sciences (ISSN 2455-4499)*,7(1).
27. Bhatnagar A, Hogland W, Marques M, Sillanpää M. (2013). An overview of the modification methods of activated carbon for its water treatment applications. *Chemical Engineering Journal*,219, 499-511.
28. Jeong S-Y, Lee J-W. Hydrothermal Treatment. *Pretreatment of Biomass*2015. p. 61-74.
29. Tekin K, Karagöz S, Bektaş S. (2014). A review of hydrothermal biomass processing. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,40, 673-87.
30. Sultan M, Miyazaki T, Koyama S. (2018). Optimization of adsorption isotherm types for desiccant air-conditioning applications. *Renewable Energy*,121, 441-50.
31. Zdravkov B, Čermák J, Šefara M, Janků J. (2007). Pore classification in the characterization of porous materials: A perspective. *Open Chemistry*,5(2), 385-95.

32. Bui TT, Nguyen DC, Hua SH, Chun H, Kim YS. (2022). Sonochemical Preparation of a Magnet-Responsive Fe₃O₄@ZIF-8 Adsorbent for Efficient Cu(2+) Removal. *Nanomaterials (Basel)*,12(5).
33. Cui B, Chen Z, Wang F, Zhang Z, Dai Y, Guo D, et al. (2022). Facile Synthesis of Magnetic Biochar Derived from Burley Tobacco Stems towards Enhanced Cr(VI) Removal: Performance and Mechanism. *Nanomaterials (Basel)*,12(4).
34. Da'na E, Al-Arjan WS, Al-Saeed S, El-Aassar MR. (2022). One-Pot Synthesis of Amine-Functionalized Nano-Silica via Sol-Gel Assisted by Reverse Micelle Microemulsion for Environmental Application. *Nanomaterials*,12(6).
35. Xu X, Li P, Yang S, Zhang T, Han X, Zhou G, et al. (2022). The Performance and Mechanism of a Mg-Al Double-Layer Oxide in Chloride ion Removal from an Aqueous Solution. *Nanomaterials (Basel)*,12(5).
36. Hernández-Barreto DF, Rodríguez-Estupiñán JP, Moreno-Piraján JC, Sierra Ramírez R, Giraldo L. (2020). Adsorption and Photocatalytic Study of Phenol Using Composites of Activated Carbon Prepared from Onion Leaves (*Allium fistulosum*) and Metallic Oxides (ZnO and TiO₂). *Catalysts*,10(5).
37. Hasani N, Selimi T, Mele A, Thaçi V, Halili J, Berisha A, et al. (2022). Theoretical, Equilibrium, Kinetics and Thermodynamic Investigations of Methylene Blue Adsorption onto Lignite Coal. *Molecules*,27(6).
38. Lach J, Ociepa-Kubicka A, Mrowiec M. (2021). Oxytetracycline Adsorption from Aqueous Solutions on Commercial and High-Temperature Modified Activated Carbons. *Energies*,14(12).
39. Wu F-C, Tseng R-L, Juang R-S. (2009). Initial behavior of intraparticle diffusion model used in the description of adsorption kinetics. *Chemical Engineering Journal*,153(1-3), 1-8.
40. Hamadi NK, Sri S, Chen XD. (2004). Adsorption of Paraquat dichloride from aqueous solution by activated carbon derived from used tires. *J Hazard Mater*,112(1-2), 133-41.

41. Tsai WT, Chen HR. (2013). Adsorption kinetics of herbicide paraquat in aqueous solution onto a low-cost adsorbent, swine-manure-derived biochar. *International Journal of Environmental Science and Technology*,10(6), 1349-56.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้