



การเตรียมและวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของถ่านชีวภาพจากเปลือกทุเรียน  
สำหรับการดูดซับแคดเมียม

Preparation and characterization of biochar from durian peel  
for cadmium adsorption

ศญาดา ว่องย่อง

Sayada Wongyong

สุภิญญา ประกอบบุญ

Suphinya Prakopbun

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

ปีการศึกษา 2564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเตรียมและวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของถ่านชีวภาพจากเปลือกทุเรียน  
สำหรับการดูดซับแคดเมียม

PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF BIOCHAR FROM DURIAN  
PEEL FOR CADMIUM ADSORPTION



ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

หลักสูตรวิศวกรรมพลังงาน

ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

ปีการศึกษา 2564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF BIOCHAR FROM DURIAN  
PEEL FOR CADMIUM ADSORPTION



A PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT  
FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF ENGINEERING IN ENERGY ENGINEERING  
DEPARTMENT OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
PRINCE OF CHUMPHON CAMPUS

2021

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2022

DEPARTMENT OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

PRINCE OF CHUMPHON CAMPUS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์จังหวัดชุมพร  
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

หัวข้อปริญญาานิพนธ์ การเตรียมและการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของถ่านชีวภาพจากเปลือกทุเรียนสำหรับการดูดซับแคดเมียม

PROJECT TITLE PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF BIOCHAR FROM DURIAN PEEL FOR CADMIUM ADSORPTION

ชื่อนักศึกษา นางสาวศรญาดา ว่องย่อง รหัสประจำตัว 61514017

นางสาวสุภิญญา ประกอบบุญ รหัสประจำตัว 61514024

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมพลังงาน

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. วารุณี ลิ้มมัน

ปริญญาานิพนธ์

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. รัชพล จุ่งเจริญ

ปริญญาานิพนธ์ร่วม

คณะกรรมการสอบปริญญาานิพนธ์			ลายมือชื่อ
รศ.ดร.ชัยวัฒน์	รัตน์มีชัยสกุล	กรรมการสอบ	ชัยวัฒน์
รศ.ดร.นฤปดี	ศรีสังข์	กรรมการสอบ	นฤปดี ศรีสังข์
ผศ.ดร.ณัฐพงศ์	รัตนเดช	กรรมการสอบ	ณัฐพงศ์ รัตนเดช
ผศ.ว่าที่ร.ต.ดร.กิตติศักดิ์	เพชรพันธ์	กรรมการสอบ	กิตติศักดิ์ เพชรพันธ์
ผศ.ดร.ศิริวรรณ	ศรีสังข์	กรรมการสอบ	ศิริวรรณ ศรีสังข์
รศ.ดร.รัชพล	จุ่งเจริญ	อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รัชพล จุ่งเจริญ
ผศ.ดร.วารุณี	ลิ้มมัน	อาจารย์ที่ปรึกษา	วารุณี ลิ้มมัน

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 8 มิถุนายน 2565 เวลา 17.00 น.

สถานที่สอบ ณ ห้องประชุมออนไลน์

ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ กุศล)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 21กรกฎาคม พ.ศ. 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การเตรียมและการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของถ่านชีวภาพจากเปลือกทุเรียนสำหรับการดูดซับแคดเมียม	
ชื่อนักศึกษา	นางสาวศัญญาดา ว่องย่อง	รหัสประจำตัว 61514017
	นางสาวสุภิญญา ประกอบบุญ	รหัสประจำตัว 61514024
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	
สาขาวิชา	วิศวกรรมพลังงาน	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.วารุณี ลิ้มมัน	
ปริญญานิพนธ์		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร. ธัชพล จุ่งเจริญ	
ปริญญานิพนธ์ร่วม		

### บทคัดย่อ

เนื่องจากการปล่อยน้ำเสียจากโรงอุตสาหกรรม ชุมชน หรือแหล่งกำจัดสิ่งปฏิกูล มักพบการปนเปื้อนของโลหะหนักเป็นจำนวนมาก ซึ่งเป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำและมนุษย์ งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการใช้ประโยชน์จากเปลือกทุเรียนหมอนทองที่เหลือทิ้งมาผลิตถ่านชีวภาพ (biochar) จากเปลือกทุเรียนหมอนทองขึ้น เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิสสำหรับการเตรียมถ่านชีวภาพต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักในสารละลายน้ำ รวมถึงศึกษาการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เพื่อเป็นแนวทางในการต่อยอดงานวิจัยต่อไป โดยเลือกใช้อุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิสที่ 600 และ 800 °C และให้ความร้อนต่อเป็นเวลา 30 60 และ 90 min จากนั้นทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียม เพื่อเลือกสารตัวอย่างที่ดีที่สุดมาดำเนินการทดลองสำหรับการกระตุ้นทางเคมีด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ผลการทดลองพบว่าถ่านชีวภาพจากเปลือกทุเรียนหมอนทองที่ใช้อุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิสที่ 800 °C และให้ความร้อนต่อเป็นเวลา 30 min มีประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียมได้ดีที่สุด (97.71%) เนื่องจากมีพื้นผิวจำเพาะและรูพรุนจำนวนมาก และมีปริมาณธาตุประกอบคาร์บอนสูง (78.60%) ซึ่งส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมได้ดีที่สุด

**คำสำคัญ :** ถ่านชีวภาพ, กระบวนการไพโรไลซิส, ดูดซับแคดเมียม, เปลือกทุเรียน

<b>Project Title</b>	Preparation and characterization of biochar from durian peel for cadmium adsorption	
<b>Student</b>	Miss Sayada Wongyong	<b>Student ID</b> 61514017
	Miss Suphinya Prakopbun	<b>Student ID</b> 61514024
<b>Degree</b>	Bachelor of Engineering	
<b>Program</b>	Energy Engineering	
<b>Project Advisor</b>	Asst.Prof.Dr. Warunee Limmun	
<b>Project Co-advisor</b>	Assoc.Prof.Dr. Thatchapol Chungcharoen	

## ABSTRACT

Discharging wastewater from industrial plants, communities, or waste disposal sites is often contaminated with large amounts of heavy metals, which is dangerous to aquatic animals and humans. Therefore, this research aims to study the utilization of Mon Thong durian peel to produce biochar and to investigate the effects of pyrolysis temperature and time on cadmium removal efficiency. Also, we focus on the chemical activation of biochar with potassium hydroxide for removing cadmium in an aqueous solution. The pyrolysis temperatures were 600 and 800 °C for 30, 60, and 90 min. The results showed that biochar derived from Mon Thong durian peel with pyrolysis temperature of 800 °C for 30 min is suitable for cadmium adsorption because of its specific surface and large pores size, and high carbon content (78.60%). Consequently, this condition had the highest removal efficiency of cadmium with 97.71%.

**Keywords:** Biochar, Pyrolysis process, Cadmium adsorption, Durian peel

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจาก ผศ.ดร.วารุณี ลิ้มมัน อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ และ รศ.ดร. ธัชพล จังเจริญ ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ แนวคิด ความรู้ต่าง ๆ ตลอดจนขั้นตอนและวิธีการในการทำปริญญาานิพนธ์

บุคคลที่ขาดมิได้คือ บิดา มารดา ผู้มีพระคุณและเป็นที่เคารพรัก ที่คอยให้การสนับสนุนและกำลังใจแก่คณะผู้จัดทำเสมอ คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่ง และขอขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ นักศึกษาที่คอยช่วยเหลือแนะนำและสนับสนุนในทุก ๆ ด้าน รวมถึงกำลังใจซึ่งทำให้การจัดทำปริญญาานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วง คณะผู้จัดทำหวังว่าปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้จะมีประโยชน์ไม่มากนักน้อยต่อผู้ที่สนใจศึกษาเกี่ยวกับถ่านชีวภาพ

ศัญดา ว่องย่อง

สุภิญญา ประกอบบุญ

มิถุนายน 2565

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	V
สารบัญรูป	VI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปริญญานิพนธ์	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
1.6 แผนการดำเนินงาน	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ทูเรียนหมอนทอง	5
2.2 โลหะหนัก	6
2.3 กระบวนการไฟโรไลซิส	6
2.4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ	8
2.5 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับถ่านชีวภาพ	9
2.6 การวิเคราะห์ BET	10
2.7 ร้อยละการผลิต	10
2.8 ปริมาณเถ้าทั้งหมด	10
2.9 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก	11
2.10 ปริมาณสารละลายที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ	11
2.11 จลนพลศาสตร์การดูดซับ	11
2.12 ไอโซเทอมการดูดซับ	12
2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการ	18
3.1 อุปกรณ์การทดลอง	18
3.2 วัสดุในการทดลอง	18
3.3 วัตถุประสงค์	18
3.4 ขั้นตอนการทำการวิจัย	19
3.5 การศึกษาการผลิตถ่านชีวภาพจากเปลือกทุเรียนหมอนทองด้วยกระบวนการ ไพโรไลซิส	20
3.6 การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาในกระบวนการไพโรไลซิสที่เหมาะสม ต่อการดูดซับแคดเมียม	20
3.7 การปรับปรุงคุณสมบัติถ่านชีวภาพ	21
3.8 การศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับแคดเมียมด้วยถ่านชีวภาพ	22
3.9 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณถ่านชีวภาพที่ใช้ในการดูดซับแคดเมียม	22
3.10 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับแคดเมียมด้วยถ่านชีวภาพ	23
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผล	24
4.1 ร้อยละการผลิต	24
4.2 ผลการวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุน	25
4.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology)	26
4.4 ประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมของสารตัวอย่างต่าง ๆ	29
4.5 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุ CHNS	29
4.6 ผลการทดลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ	30
4.7 ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโตรโปรโตมิเตอร์ (FTIR) ของ DP800-30 ก่อนและหลังการดูดซับแคดเมียม	33
4.8 การกระตุ้นถ่านชีวภาพทางเคมีด้วย KOH	34
4.9 ผลการศึกษาอิทธิพลของค่า pH และปริมาณถ่านชีวภาพที่ใช้ในการดูดซับ แคดเมียม	36
4.10 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ	37
4.11 ผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการดูดซับแคดเมียม	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	40
5.1 สรุปผลการวิจัย	40
5.2 ข้อเสนอแนะจากการศึกษาวิจัย	41
เอกสารอ้างอิง	42
ภาคผนวก	46
ประวัติผู้จัดทำ	64



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1	4
4.1	25
4.2	26
4.3	28
4.4	29
4.5	30
4.6	33
4.7	38

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	แผนผังการทำงาน	3
2.1	ทุเรียนหมอนทอง	5
2.2	กระบวนการไฟโรไลซิสแบบเร็ว	8
2.3	ไอโซเทอมการดูดซับ	12
3.1	แผนผังขั้นตอนการทำการวิจัย	19
4.1	ถ่านชีวภาพ	24
4.2	โครงสร้างพื้นผิวโดยใช้กล้อง FESEM ของตัวอย่างถ่านชีวภาพต่าง ๆ	27
4.3	ประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมของแต่ละสารตัวอย่างที่เวลาต่าง ๆ	31
4.4	ความสามารถในการดูดซับแคดเมียมของแต่ละสารตัวอย่างที่เวลาต่าง ๆ	32
4.5	ค่า pH ที่การดูดซับแคดเมียมของแต่ละสารตัวอย่างที่เวลาต่าง ๆ	32
4.6	สเปกตรัม FTIR ของ DP800-30 ก่อนและหลังการดูดซับแคดเมียม	34
4.7	หมู่ฟังก์ชันบนพื้นที่ผิวของ DP800-30 และ KDP800-30	35
4.8	ประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียมของถ่านชีวภาพก่อนและหลังการกระตุ้นด้วย KOH	35
4.9	ลักษณะทางสัญญาณวิทยาของ KDP800-30	36
4.10	ประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียมของถ่านชีวภาพที่ค่า pH ต่าง ๆ	37
4.11	ไอโซเทอมการดูดซับของถ่านชีวภาพ DP800-30	38
4.12	ประสิทธิภาพและความสามารถในการดูดซับแคดเมียมที่อุณหภูมิต่าง ๆ	39

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปริญญานิพนธ์

น้ำเสียชุมชน น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม แหล่งกำจัดขยะและสิ่งปฏิกูล มักมีการตรวจพบการปนเปื้อนของโลหะหนัก เช่น แคดเมียม ทองแดงและตะกั่ว เป็นต้น โลหะหนักเหล่านี้เป็นพิษต่อร่างกาย อีกทั้งไม่สามารถย่อยสลายเองได้ ดังนั้นจึงควรให้ความสำคัญกับการบำบัดสิ่งปนเปื้อนเหล่านี้ก่อนปล่อยลงสู่แหล่งกักเก็บน้ำ โดยเทคโนโลยีการบำบัดการปนเปื้อนโลหะหนักแบบดั้งเดิมมีหลายวิธี เช่น การบำบัดทางชีวภาพ (Bioremediation) [1] การตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation) [2] การแยกเมมเบรน (Membrane separation) [3] เป็นต้น วิธีการข้างต้นสามารถกำจัดโลหะหนักในสารละลายน้ำได้ แต่มีราคาแพงและไม่มีประสิทธิภาพเมื่อใช้ในปริมาณมาก จึงมีการหาเทคโนโลยีอื่นที่มีประสิทธิภาพสูงและมีต้นทุนต่ำมาใช้ในการกำจัดโลหะหนักแทน

ปัจจุบันมีการให้ความสนใจในการใช้ถ่านชีวภาพสำหรับการกำจัดการปนเปื้อนของน้ำเสีย โดยพิจารณาจากต้นทุนการผลิตและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ถ่านชีวภาพหรือไบโอชาร์ (Biochar) คือวัสดุที่อุดมด้วยคาร์บอน สามารถผลิตได้จากชีวมวลหรือสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้จากธรรมชาติหรือวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร เช่น ใบไม้ กิ่งไม้ ฟางข้าว เหง้ามันสำปะหลัง มูลสัตว์ กากตะกอนของเสีย เป็นต้น นำมาผ่านกระบวนการเผาไหม้ที่มีการควบคุมอุณหภูมิและจำกัดอากาศให้เข้าไปเผาไหม้น้อยที่สุด กระบวนการเผาไหม้ นี้ เรียกว่า การแยกสลายด้วยความร้อนหรือกระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งถ่านชีวภาพมีความสามารถในการดูดซับไอออน จึงสามารถนำมาใช้บำบัดสิ่งปนเปื้อนในสารละลายน้ำได้ [4]

ข้อมูลจากศูนย์สารสนเทศการเกษตรปี พ.ศ. 2559 ระบุว่าจังหวัดชุมพรเป็นแหล่งเพาะปลูกทุเรียนที่มีเนื้อที่เพาะปลูกมากที่สุดเป็นอันดับ 2 รองจากจังหวัดจันทบุรี ในปัจจุบันมีพื้นที่เพาะปลูกทุเรียนประมาณ 300,000 ไร่และสร้างรายได้ให้เกษตรกรกว่า 20,000 ล้านบาทต่อปี โดยสายพันธุ์ทุเรียนที่จังหวัดชุมพรนิยมปลูก 90% คือ สายพันธุ์หมอนทอง ซึ่งนิยมขายทุเรียนทั้งลูกและนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหารหลากหลาย เช่น ทุเรียนทอด ทุเรียนกวน เป็นต้น [5] โดยการแปรรูปจะเป็นการนำเนื้อของทุเรียนไปแปรรูป ทำให้เหลือส่วนที่เป็นเปลือกที่ไม่ได้นำไปใช้ประโยชน์ ลักษณะเปลือกทุเรียนหมอนทองค่อนข้างบาง มีหนามแหลมรอบเปลือก ความยาวของเปลือกประมาณ 20 – 30 cm จากการศึกษาคุณสมบัติพบว่า เปลือกทุเรียนมีปริมาณเส้นใยสูง มีคาร์บอน เพคตินและส่วนประกอบอื่น ๆ ซึ่งมีส่วนในการสนับสนุนการดูดซับไอออนของโลหะหนักไปยังถ่านชีวภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการใช้ประโยชน์จากเปลือกทุเรียนหมอนทองที่เหลือทิ้งจากการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหาร เพื่อนำมาสังเคราะห์เป็นถ่านชีวภาพและศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิสสำหรับการเตรียมถ่านชีวภาพต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักในสารละลายน้ำ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการผลิตถ่านชีวภาพจากเปลือกทุเรียนหมอนทองด้วยกระบวนการไพโรไลซิส และศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านชีวภาพที่ได้

1.2.2 เพื่อศึกษาอุณหภูมิในการผลิตถ่านชีวภาพ ค่า pH ระยะเวลาการสัมผัส ปริมาณถ่านชีวภาพและอุณหภูมิในการดูดซับแคดเมียม ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักแคดเมียมในสารละลายน้ำ โดยใช้ถ่านชีวภาพจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 เปลือกทุเรียนหมอนทองที่ใช้ในการทดลองนี้ ทำการเก็บตัวอย่างจากบริษัท ทะเลทรัพย์ ฟริชตราย จำกัด อำเภอปะทิว จังหวัดชุมพร

1.3.2 การผลิตถ่านชีวภาพจากเปลือกทุเรียนหมอนทองด้วยกระบวนการไพโรไลซิสในช่วงอุณหภูมิ 600 และ 800 °C

1.3.3 การผลิตถ่านชีวภาพจากเปลือกทุเรียนหมอนทองโดยการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่มีความเข้มข้น 2.5 M

1.3.4 ศึกษาการกำจัดโลหะหนักแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำการทดลองแบบแบตช์ (Batch experiment)

1.3.5 ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักแคดเมียม ได้แก่ อุณหภูมิในการผลิตถ่านชีวภาพ ค่า pH ระยะเวลาการสัมผัส ปริมาณถ่านชีวภาพและอุณหภูมิในการดูดซับแคดเมียม

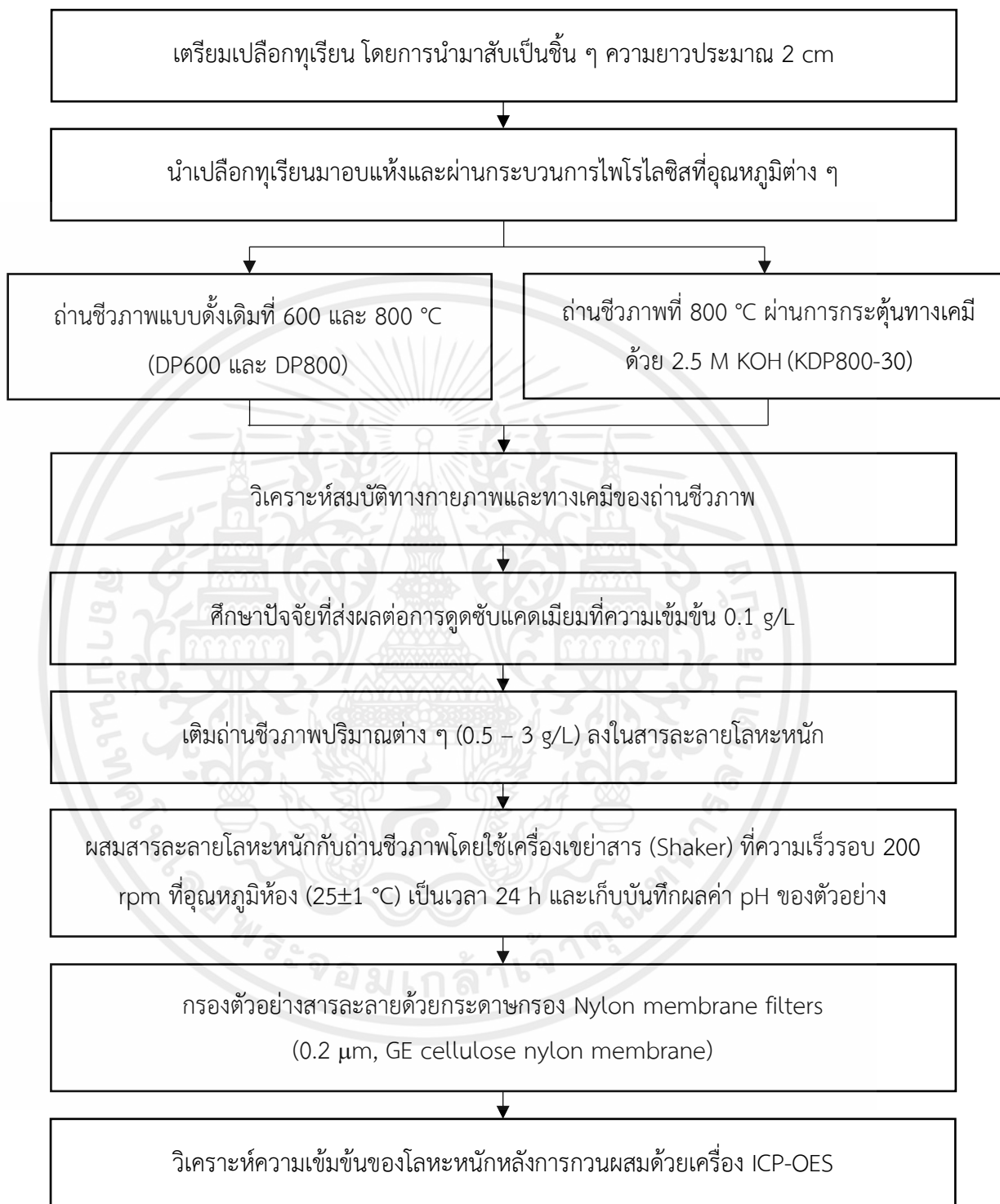
## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เป็นการนำเปลือกทุเรียนหมอนทอง ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาใช้ประโยชน์ในการดูดซับโลหะหนักและเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

1.4.2 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการผลิตถ่านชีวภาพจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน



รูปที่ 1.1 แผนผังการดำเนินงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ทูเรียนหมอนทอง

ทูเรียนเป็นผลเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทย มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Durio zibethinus* Murr. อยู่ในวงศ์ Bombacaceae ซึ่งทูเรียนมีหลากหลายสายพันธุ์ แต่ละสายพันธุ์จะมีลักษณะที่แตกต่างกันไป โดยทูเรียนสายพันธุ์หมอนทองมีผลขนาดใหญ่ รูปทรงทรงกระบอกยาว ผิวสีเขียวถึงเหลืองอมน้ำตาล ก้านผลเรียวยาว เปลือกของทูเรียนหมอนทองจะมีหนามแหลมใหญ่และเล็กปนกันรอบผล เปลือกบาง ความยาวประมาณ 20 – 30 cm เนื้อด้านในหนาและมีสีเหลืองอ่อน เนื้อแห้งและไม่ละติมือ รสชาติหวานมัน มีเมล็ดน้อยและค่อนข้างลีบ [6]

โดยทั่วไป ผลทูเรียนมีสัดส่วนของเนื้อทูเรียน 10 - 30% และส่วนเหลือทิ้ง ได้แก่ เปลือก 50 - 60% และเมล็ด 10 - 20% ทูเรียนเป็นผลไม้ที่อุดมไปด้วยคุณค่าทางโภชนาการ เช่น เนื้อทูเรียนประกอบด้วยน้ำตาล วิตามินซี โพแทสเซียม โปรตีน คาร์โบไฮเดรต ไขมัน วิตามินบีหนึ่ง วิตามินบีสอง วิตามินอี ฟอสฟอรัส แคลเซียม เหล็กและสารระเหยให้กลิ่น ในส่วนของเมล็ดทูเรียน มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นคาร์โบไฮเดรต 50 - 70% และเปลือกทูเรียนประกอบด้วยเถ้า 4.84% เฮมิเซลลูโลส 13.09% และลิกนิน 15.45% รวมถึงเพคตินและสารประกอบอื่น ๆ [7]



รูปที่ 2.1 ทูเรียนหมอนทอง [8]

## 2.2 โลหะหนัก

โลหะหนัก หมายถึง ธาตุที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไป มีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23 – 92 ภายในคาบที่ 4 – 7 มีสถานะเป็นของแข็ง ยกเว้นปรอทที่มีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ มีคุณสมบัติทางกายภาพที่คล้ายคลึงกัน เช่น การนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี ไม่สามารถย่อยสลายเองได้ โดยโลหะหนักเหล่านี้บางชนิดมีประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมและบางชนิดเป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์

แคดเมียม (Cadmium : Cd) เป็นธาตุโลหะหนักสีเงินแกมขาว น้ำหนักเบา อ่อนและทนทานต่อการกัดกร่อน ไม่ละลายน้ำ แต่จะละลายได้ดีในกรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) นิยมนำแคดเมียมไปใช้ประโยชน์ด้านอุตสาหกรรม เช่น ใช้ผสมกับโลหะอื่นเพื่อเพิ่มความเหนียวและทนทานต่อการกัดกร่อน ใช้ชุบโลหะ และใช้ร่วมกับโลหะนิกเกิลเพื่อผลิตเป็นแบตเตอรี่ เป็นต้น จากการนำแคดเมียมไปใช้ประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรมส่งผลให้เกิดแคดเมียมปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม บรรยากาศ อาหารและน้ำ และยังสามารถซึมซับเข้าผิวหนังของมนุษย์ได้อีกด้วย หากอาศัยอยู่ในแหล่งอุตสาหกรรมที่มีการใช้แคดเมียมและเกิดการปนเปื้อน จะส่งผลให้เกิดพิษสะสมในตัวมนุษย์ได้ ความเป็นพิษแบบเฉียบพลันที่เกิดจากการทานอาหารที่มีการปนเปื้อนของแคดเมียมจะเป็นพิษต่อระบบทางเดินอาหาร ส่งผลให้มีอาการอาเจียนและท้องร่วง ในบางรายที่เป็นมากอาจระบบไตหยุดทำงานและเสียชีวิตได้ หากสูดดมอากาศที่มีแคดเมียมปนเปื้อนจะส่งผลให้ระคายเคืองปอด หลอดลม ลำคอ จมูก และทำให้เกิดอาการเวียนศีรษะ ไอ อ่อนเพลีย เจ็บหน้าอก และความเป็นพิษแบบเรื้อรัง ซึ่งเกิดจากร่างกายได้รับพิษและสะสมเป็นเวลานาน ส่งผลให้เกิดโรคถุงลมโป่งพอง โรคกระดูกพรุน โรคหัวใจ โรคโลหิตจางและโรคมะเร็ง เป็นต้น [9]

## 2.3 กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis)

กระบวนการไพโรไลซิส จะเป็นกระบวนการการแตกตัวหรือการสลายของโมเลกุลสารประกอบหรือวัสดุต่าง ๆ ในสภาวะที่ปราศจากออกซิเจน ซึ่งจะอยู่ช่วงอุณหภูมิสูงที่ประมาณ 400 – 800 °C และผลิตภัณฑ์หลักที่จะได้รับจะประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่ ของแข็งหรือถ่าน (char) ของเหลวซึ่งมีจะลักษณะและสมบัติคล้ายน้ำมันและแก๊ส โดยถ่านที่ได้จะสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือสามารถนำไปกระตุ้นต่อได้เพื่อให้เป็นถ่านกัมมันต์ (activated carbon) ซึ่งสามารถนำไปใช้งานได้อีกหลากหลาย เช่น ใช้ในการดูดซับสารอันตราย ส่วนน้ำมันอาจนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ทันทีหรือหลังจากการปรับปรุงสมบัติก่อนการใช้งานที่เหมาะสมแก่เครื่องยนต์แต่ละชนิด และในส่วนของแก๊สสามารถนำมาเป็นเชื้อเพลิงได้ เช่นเดียวกันกับน้ำมันและถ่าน สำหรับสัดส่วนและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ในแต่ละชนิดจะไม่แน่นอน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น องค์ประกอบของวัตถุดิบเริ่มต้น อัตราเร็วในการให้ความร้อน อุณหภูมิและความดัน เป็นต้น กระบวนการไพโรไลซิสชีวมวล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือวัสดุเหลือทิ้งทางเกษตรมีการศึกษาหลากหลายรูปแบบ ทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยเฉพาะในประเทศเกษตรกรรมที่มีวัสดุเหลือทิ้งทางเกษตรจำนวนมาก ซึ่งก่อปัญหาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตามมา

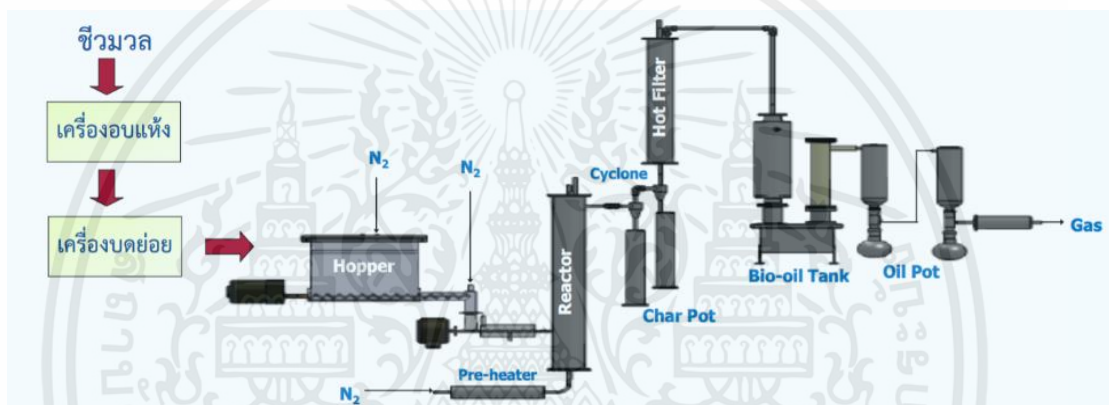
กระบวนการไพโรไลซิสสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภท คือ กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า (slow pyrolysis) และกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว (fast pyrolysis)

2.3.1 กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า ซึ่งกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าเป็นกระบวนการที่มีการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิระหว่าง 400 – 600 °C ซึ่งจะมีอัตราการให้ความร้อนต่ำ (น้อยกว่า 10 °C/min) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุดิบที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาจะมีขนาดใหญ่กว่า 2 mm ผลผลิตจากการไพโรไลซิสแบบช้าจะมีสัดส่วนเป็นของเหลว 30 - 50% และถ่าน 25 - 35% การไพโรไลซิสแบบช้าสามารถแบ่งออกเป็น 2 กระบวนการย่อย คือ คาร์บอนไนเซชันไพโรไลซิส (carbonization pyrolysis) และไพโรไลซิสแบบดั้งเดิม (conventional pyrolysis) คาร์บอนไนเซชันไพโรไลซิสจะเป็นกระบวนการที่ให้ความร้อนในระยะเวลาอันยาวนาน โดยการใช้เวลาประมาณหนึ่งวัน ได้ผลผลิตเป็นถ่านสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงในการทำอาหาร ส่วนผลผลิตในสถานะก๊าซจะถูกปลดปล่อยออกสู่ชั้นบรรยากาศ สำหรับกระบวนการไพโรไลซิสแบบดั้งเดิมจะเป็นกระบวนการที่ใช้เวลาในการให้ความร้อนน้อยกว่า คือ 15 - 30 min ได้ผลผลิตครบสามสถานะ คือ ถ่าน น้ำมันและก๊าซไม่กลั่นตัว เนื่องจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าได้ผลผลิตในส่วนของน้ำมันในปริมาณน้อย ดังนั้นน้ำมันส่วนใหญ่จะถูกใช้เพื่อเป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการเผาไหม้ แต่อย่างไรก็ตาม เราสามารถแยกสารเคมีบางชนิดออกจากส่วนมีขี้หรือส่วนที่ละลายน้ำของน้ำมันได้ โดยสารเคมีที่สามารถสกัดได้จากน้ำมัน ในส่วนนี้ ได้แก่ อะซิโตน คีโตน เมทานอล กรดฟอร์มิกและกรดอะซิติก เป็นต้น

2.3.2 กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว เป็นกระบวนการที่ได้น้ำมันเป็นผลิตภัณฑ์หลัก โดยการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิตั้งแต่ 400 - 650 °C ซึ่งมีอัตราการให้ความร้อนสูง (มากกว่า 1,000 °C/sec) เส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุดิบจะมีขนาดต่ำกว่า 2 mm และมีระยะเวลาของไอที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์สั้นมาก (น้อยกว่า 2 sec) เมื่อใช้วัตถุดิบประเภทชีวมวลจะทำให้ได้สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ในสถานะของเหลว เรียกว่าน้ำมันชีวภาพ ประมาณ 60 - 75% ของแข็ง 15 - 25% และก๊าซไม่กลั่นตัว 10 - 15% และมีองค์ประกอบของน้ำในน้ำมันชีวภาพ 10 - 30% ขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นที่มีในชีวมวลเริ่มต้น นอกจากนี้ น้ำมันชีวภาพยังประกอบด้วยสารประกอบอื่น ๆ ซึ่งเป็นสารเคมีที่ได้จากการสลายตัวทางความร้อนและการทำปฏิกิริยาของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน ในชีวมวลและองค์ประกอบของสารเคมีส่วนใหญ่ในน้ำมันชีวภาพจากวัตถุดิบประเภทชีวมวล แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากองค์ประกอบส่วนใหญ่ในน้ำมันชีวภาพเป็นสารประกอบอินทรีย์ ดังนั้น น้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วจะสามารถปรับปรุงคุณภาพเป็นเชื้อเพลิงและสารเคมีได้หลายประเภท โดยสารประกอบที่พบในน้ำมันชีวภาพมีมากกว่า 3,000 ชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สิ่งที่สำคัญที่สุดในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว คือ การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ให้มีอัตราการถ่ายโอนความร้อนสูง และออกแบบให้ออกล้นตัวเป็นของเหลวโดยเร็วที่สุดเพื่อให้ได้ปริมาณน้ำมัน 70 – 80 % นอกจากนี้ยังต้องออกแบบให้มีการกำจัดถ่านและเถ้าออกจากผลิตภัณฑ์ให้มากที่สุด เพื่อได้ผลิตภัณฑ์ที่สะอาด ไม่มีเถ้าเจือปน ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการนำไปใช้ประโยชน์ กระบวนการผลิตน้ำมันจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วประกอบด้วยหน่วยต่าง ๆ ได้แก่ หน่วยลดความชื้นและย่อยขนาดชีวมวล (biomass drying and grinding) หน่วยทำปฏิกิริยา (fast pyrolysis reactor) หน่วยกำจัดถ่านและเถ้า (char removal) หน่วยควบแน่นและเก็บผลิตภัณฑ์น้ำมัน (product collection) [10] ตัวอย่างของกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วจากวัตถุดิบประเภทชีวมวลแสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว [11]

## 2.4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

2.4.1 พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน (Surface area and pore structure) ซึ่งพื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุนจะมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพของการดูดซับโดยตรง โดยพื้นที่ผิวของการดูดซับจะมากขึ้นและประกอบกับมีโครงสร้างรูพรุนที่ช่วยเพิ่มพื้นที่ในการดูดซับ ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้นมาก เพราะเป็นกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นที่ผิวเป็นส่วนใหญ่

2.4.2 ขนาดของตัวดูดซับ ในกรณีที่สารดูดซับไม่มีรูพรุนหรือมีรูพรุนน้อยจะทำให้ขนาดของตัวดูดซับลดลงและลดความสามารถในการดูดซับไปด้วย เมื่อพื้นที่ผิวในการดูดซับเพิ่มขึ้นจะทำให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงขึ้นตามไปด้วย แต่ถ้าหากสารดูดซับมีรูพรุนมาก ๆ จะส่งผลให้พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับที่อยู่ในรูพรุนมีพื้นที่น้อยลง ในกรณีนี้ความสามารถในการดูดซับจะไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของวัตถุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 หมู่ฟังก์ชันทางเคมี ซึ่งหมู่ฟังก์ชันทางเคมีที่อยู่บนผิวของตัวดูดซับสามารถมีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับด้วยเช่นกัน เนื่องจากบางหมู่ฟังก์ชันสามารถยึดเหนี่ยวตัวถูกดูดซับแล้วทำให้เกิดเป็นการดูดซับทางเคมีได้ ซึ่งได้แก่ คาร์บอกซิล (COOH) หมู่เอมีน (NH<sub>2</sub>) และหมู่ซัลเฟต (SO<sub>3</sub><sup>-</sup>) ซึ่งจะประจุลบในสารละลาย ทำให้สามารถดูดซับไอออนของโลหะหนักได้

## 2.5 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับถ่านชีวภาพ

2.5.1 คำนิยามและความหมายของถ่านชีวภาพหรือไบโอชาร์ (Biochar) คือ วัสดุที่อุดมด้วยคาร์บอน ผลิตจากการให้ความร้อนมวลชีวภาพ (biomass) โดยไม่ใช้ออกซิเจนหรือใช้น้อยมาก และเรียกกระบวนการนี้ว่าการแยกสลายด้วยความร้อน (pyrolysis) ซึ่งจะมีสองวิธีการหลัก ๆ คือ การแยกสลายอย่างรวดเร็วและการแยกสลายอย่างช้า การผลิตถ่านชีวภาพด้วยวิธีการแยกสลายอย่างช้าจะมีอุณหภูมิเฉลี่ยที่ 500 °C ซึ่งจะได้ผลการผลิตของถ่านชีวภาพมากกว่า 50% แต่จะใช้เวลาในการผลิตเป็นชั่วโมง ซึ่งจะแตกต่างจากการผลิตโดยวิธีการแยกสลายอย่างรวดเร็ว อุณหภูมิเฉลี่ยจะอยู่ที่ 700 °C ใช้เวลาแค่วินาที ซึ่งผลการผลิตที่ได้จะเป็นน้ำมันชีวภาพ (bio-oil) 60% แก๊สสังเคราะห์ (syngas) ได้แก่ H<sub>2</sub>, CO และ CH<sub>4</sub> รวมกัน 20% และถ่านชีวภาพ 20%

2.5.2 คุณสมบัติและประโยชน์ของถ่านชีวภาพ ถ่านชีวภาพจะมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการปรับปรุงดินหลายอย่าง แต่ที่สำคัญที่สุดคือ รูพรุนที่ผิวของถ่าน ซึ่งจะทำให้ถ่านชนิดนี้สามารถเก็บน้ำและธาตุอาหารได้และรวมทั้งสามารถเป็นที่อยู่ของจุลินทรีย์ในดินที่เป็นประโยชน์ได้ โดยก่อนที่จะนำถ่านชีวภาพไปใช้ในการปรับปรุงดินควรเติมจุลินทรีย์และธาตุอาหารก่อน ที่จริงแล้วถ่านทุกชนิดมีรูพรุนมากกว่าวัสดุตั้งต้น ซึ่งขนาดและปริมาณของความพรุนในถ่านนี้ขึ้นอยู่กับวัสดุที่นำมาเผาเป็นถ่านและกรรมวิธีการเผา คุณสมบัติรองลงมาก็คือ ถ่านที่มีสภาพที่เป็นต่างเล็กน้อย จึงสามารถช่วยลดสภาพความเป็นกรดของดินลงได้บางส่วน นอกจากนี้ ถ่านชีวภาพยังมีธาตุไนโตรเจน (เป็นประโยชน์กับพืช) รวมทั้งมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (ทำให้เก็บกักธาตุอาหารได้มาก)

2.5.3 ความแตกต่างระหว่างถ่านชีวภาพและถ่านกัมมันต์ ถ่านชีวภาพและถ่านกัมมันต์หรือผงถ่าน (Activated Charcoal or Activated Carbon) คือ ถ่านหรือคาร์บอนทั้งคู่ มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยที่กระบวนการผลิต คุณสมบัติและวัตถุประสงค์ในการใช้ประโยชน์ การใช้ประโยชน์จากถ่านชีวภาพ คือ ใช้ประโยชน์จาก Porous Property ในการกักเก็บน้ำในดิน กักเก็บคาร์บอนลงดิน เป็นที่อยู่ของจุลินทรีย์ในการสร้างอาหารในดิน ถ่านกัมมันต์จะใช้ประโยชน์ในทางการแพทย์ เช่น ใช้เป็นยาในการรับประทานเพื่อดูดสารพิษในร่างกายหรือในทางอุตสาหกรรมเพื่อกรองสารพิษออกไปจากสารประกอบ เป็นต้น สำหรับ Charcoal หรือถ่านทั่วไปมีวัตถุประสงค์ในการใช้ทำเป็นเชื้อเพลิง ใช้ระยะเวลาในการผลิตนานกว่า วัสดุที่ใช้ในการผลิตมีความชื้นมากกว่าเพราะผู้ผลิตหวังจะได้น้ำมันส้มควันไม้ (Wood Vinegar) เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการทำปุ๋ยให้กับพืช ซึ่งถ่านกัมมันต์

ค่อนข้างใกล้เคียงกับถ่านชีวภาพ เนื่องจากใช้ความร้อนสูงใกล้เคียงกันในกระบวนการผลิต (700 – 1000 °C) แต่จะแตกต่างกันที่ถ่านกัมมันต์จะสามารถใช้ไอน้ำหรือสารเคมีเป็นตัวกระตุ้นก็ได้ บางชนิดใช้สารเคมีเคลือบผิวถ่านอีกที ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้งาน

2.5.4 การกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation) เป็นการกระตุ้นด้วยการใช้สารเคมี เช่น สังกะสีคลอไรด์ กรดฟอสฟอริกและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น ซึ่งสามารถแทรกซึมได้ทั่วถึง และจะทำให้ส่วนที่ไม่บริสุทธิ์ละลายหมดไปได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งจะใช้อุณหภูมิในการเผาที่ประมาณ 600 - 700 °C และล้างสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้นที่ติดมากับถ่านชีวภาพออกให้หมด เพื่อความปลอดภัยในการนำไปใช้งาน [12]

## 2.6 การวิเคราะห์ BET

ทฤษฎี Brunauer–Emmett–Teller (BET) มีวัตถุประสงค์เพื่ออธิบายการดูดซับทางกายภาพของโมเลกุลแก๊สบนพื้นผิวที่เป็นของแข็ง ซึ่งเป็นเทคนิคการวิเคราะห์เพื่อหาพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของสารตัวอย่าง โดยอาศัยเทคนิคการดูดซับแก๊สไนโตรเจนทั้งบนพื้นผิวและภายในรูพรุนของสารตัวอย่าง จากนั้นทำการทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน (Surface area and porosity analyzer) ทำการประมวลผลโดยใช้โปรแกรมตามสมการของ BET แสดงผลเป็นค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน [13]

## 2.7 ร้อยละผลผลิต

$$\text{ร้อยละผลผลิต (\% Yield)} = \frac{\text{น้ำหนักของถ่านชีวภาพ (g)}}{\text{น้ำหนักของตัวอย่างก่อนเผา (g)}} \times 100 \quad (2.1)$$

## 2.8 ปริมาณเถ้าทั้งหมด

$$\text{เปอร์เซ็นต์เถ้าทั้งหมดในตัวอย่างแห้ง} = \frac{(B_1 - C)}{W} \times 100 \quad (2.2)$$

โดยที่  $B_1$  คือ น้ำหนักถ้วยกระเบื้อง + น้ำหนักถ้วยภายหลังการเผา (g)

$C$  คือ น้ำหนักถ้วยกระเบื้อง (g)

$W$  คือ น้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ (g)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.9 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก

$$\text{Removal Efficiency (\%)} = \frac{(C_o - C_i)}{C_o} \times 100 \quad (2.3)$$

โดยที่  $C_o$  คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะหนัก (mg/L)

$C_e$  คือ ความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลายโลหะหนัก (mg/L)

## 2.10 ปริมาณสารละลายที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ

$$q_e = \frac{(C_o - C_i)}{W} \times V \quad (2.4)$$

โดยที่  $q_e$  คือ ปริมาณสารละลายที่ถูกดูดซับต่อปริมาณวัสดุดูดซับ (mg/L)

$C_o$  คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย (mg/L)

$C_i$  คือ ความเข้มข้นหลังการดูดซับ (mg/L)

$V$  คือ ปริมาตรของสารละลาย (L)

$W$  คือ ปริมาณวัสดุดูดซับ (g)

## 2.11 จลนพลศาสตร์การดูดซับ (Adsorption Kinetics)

สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับ เป็นสมการที่ใช้สำหรับออกแบบระบบการดูดซับ โดยแบบจำลองจลนพลศาสตร์ที่นิยมนำมาใช้คือ สมการอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order, PFO) และสมการอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-second order, PSO)

ลาเกอร์เกรน เป็นผู้เสนอสมการอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียมขึ้น โดยสมการนี้ถูกพัฒนาและใช้เพื่ออธิบายการดูดซับกรดมาโลนิกและโอคาลิคบนพื้นผิวของถ่านชาโคล ซึ่งมีรูปแบบทางคณิตศาสตร์ ดังนี้

$$q_t = q_e(1 - \exp(-k_1 t)) \quad (2.5)$$

โดยที่  $q_t$  คือ ปริมาณของตัวตัวถูกดูดซับที่ดูดซับโดยตัวดูดซับ ณ เวลา  $t$  (mg/g)

$q_e$  คือ ปริมาณของตัวตัวถูกดูดซับที่ดูดซับโดยตัวดูดซับ ณ เวลาสมดุล (mg/g)

$k_1$  คือ ค่าคงที่อัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม ( $\text{min}^{-1}$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปแล้ว ค่า  $k_1$  จะขึ้นอยู่กับค่า pH ของสารละลาย อุณหภูมิและความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกละลาย [14]

สมการอัตราการดูดซับอันดับสองเทียมมีรูปแบบทางคณิตศาสตร์ ดังนี้

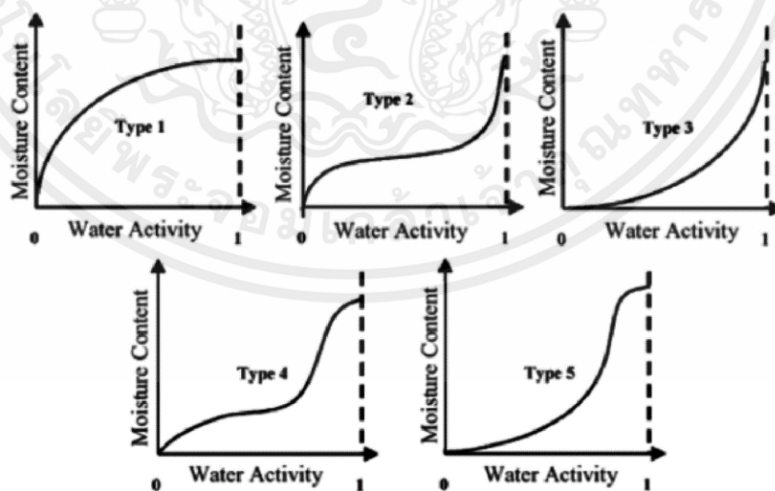
$$q_t = \frac{q_e^2 k_2 t}{1 + q_e k_2 t} \quad (2.6)$$

โดยที่  $k_2$  คล้ายกับ  $k_1$  ในสมการอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม ผลของ  $k_2$  ต่อปริมาณของตัวถูกละลายและตัวดูดซับ

ยิ่งค่า  $k_2$  สูง จะยิ่งส่งผลให้เวลาในการที่ระบบเข้าสู่สมดุลสั้นลง เช่นเดียวกับ  $k_1$  สมการอัตราการดูดซับอันดับสองเทียมให้ผลที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสมการอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม [15] ดังนั้นสมการอัตราการดูดซับอันดับสองเทียมจึงใช้ทำนายได้ดีกว่า

## 2.12 ไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอมการดูดซับ เป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดซับกับความเข้มข้นของสาร ณ อุณหภูมิคงที่ในสภาวะสมดุล เมื่อนำความสัมพันธ์ที่ได้มาเขียนกราฟจะได้เป็นเส้นแนวโน้มที่เรียกว่า ไอโซเทอมการดูดซับ โดยไอโซเทอมการดูดซับจะแสดงลักษณะการดูดซับสามารถแสดงได้ 5 รูปแบบพื้นฐาน ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ไอโซเทอมการดูดซับ [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไอโซเทอมการดูดซับรูปแบบที่ 1 เป็นการดูดซับที่รูพรุนมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของโมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่มาก โมเลกุลสามารถเคลื่อนผ่านรูพรุนได้และเกิดการเรียงตัวเป็นชั้นเดียว รูปแบบที่ 2 ตัวดูดซับมีการกระจายขนาดรูพรุนในช่วงกว้าง โมเลกุลเรียงตัวจากชั้นเดียวจนถึงหลายชั้นจนเกิดการดูดซับแบบต่อเนื่อง โดยรูปแบบที่ 3 มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลกับพื้นผิวตัวดูดซับมากกว่ารูปแบบที่ 2 ส่วนรูปแบบที่ 4 รูพรุนมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของโมเลกุลที่ถูกดูดซับมาก โมเลกุลจึงเกิดการเรียงตัวเป็นแบบสองชั้นที่ผิวตัวดูดซับ และรูปแบบที่ 5 เกิดขึ้นเมื่อแรงดึงดูดของผิวตัวดูดซับกับโมเลกุลที่ถูกดูดซับมีมากขึ้น

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นิยมนำมาใช้อธิบายลักษณะการดูดซับคือ สมการไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) และสมการไอโซเทอมการดูดซับของฟรอยด์ลิช (Freundlich isotherm) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่พัฒนาการดูดซับก๊าซที่ผิวของของแข็ง โดยมีสมมติฐานการทดลอง ดังนี้

2.12.1 มีตำแหน่งที่เกิดการดูดซับที่แน่นอนและเมื่อเกิดการดูดซับแล้วโมเลกุลจะไม่ซ้อนทับกัน หรือชั้นของตัวถูกดูดซับจะมีความหนาแน่นเท่ากันทั้งหมด

2.12.2 โมเลกุลที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับจะไม่มีการเคลื่อนย้ายหรือเปลี่ยนตำแหน่ง

2.12.3 ตำแหน่งของพื้นที่ผิวของการดูดซับและกลไกการดูดซับที่เหมือนกันจะทำให้สารเชิงซ้อนที่เหมือนกัน

2.12.4 พลังงานการดูดซับจะเท่ากันในทุกพื้นที่ของตัวดูดซับ [17]

สมการไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) แสดงดังสมการต่อไปนี้

$$Q_e = \frac{Q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (2.7)$$

โดยที่  $C_e$  คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่จุดสมดุล (mg/L)

$Q_e$  คือ ปริมาณการดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (mg/g)

$Q_m$  คือ ความสามารถในการดูดซับสูงสุด แบบชั้นเดียว (mg/g)

$K_L$  คือ ค่าคงที่การดูดซับที่สมดุลของ Langmuir (L/mg)

สมการไอโซเทอมการดูดซับของฟรอนด์ลิช (Freundlich isotherm) แสดงดังสมการต่อไปนี้

$$Q_e = K_F C_e^{\frac{1}{n}} \quad (2.8)$$

โดยที่  $Q_e$  คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาตรของตัวดูดซับที่ภาวะสมดุล (mg/g)

$K_F$  คือ ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น (mg/g)

$C_e$  คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (mg/L)

$n$  คือ ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลาย

## 2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้เป็นการผลิตถ่านชีวภาพจากเปลือกทุเรียนหมอนทองด้วยกระบวนการไพโรไลซิสและศึกษากระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โดยศึกษางานวิจัยที่สอดคล้องกัน เพื่อนำมาเป็นแนวทางในการศึกษาและนำมาปรับใช้ในงานวิจัย ซึ่งมีดังนี้

กุลธิดา สะอาด [18] ทำการเตรียมถ่านชีวภาพโดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้นเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดติดผิวและร้อยละการกำจัดไอออนทองแดงในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ รวมถึงศึกษาสมบัติทางกายภาพของถ่านชีวภาพที่เตรียม โดยชนิดของถ่านชีวภาพที่นำมาทดลอง ได้แก่ เปลือกทุเรียน เปลือกมังคุด เปลือกขนุน กะลามะพร้าวและเมล็ดลำไย โดยใช้ปริมาณถ่านชีวภาพ 0.5 1.0 และ 1.5 g ผลการทดลอง พบว่า ชนิดและปริมาณของถ่านชีวภาพที่สามารถดูดติดผิวและกำจัดไอออนทองแดงได้ดีที่สุด คือ เปลือกทุเรียนที่มีปริมาณ 1.5 g ส่วนถ่านชีวภาพที่ดูดติดผิวและกำจัดไอออนทองแดงได้น้อยที่สุด คือ เมล็ดลำไยที่มีปริมาณ 0.5 g

อรทัย วงษาเวียง และคณะ [19] นำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร 3 ชนิด ได้แก่ เปลือกส้มโอ ขานอ้อยและฝักราชพฤกษ์ มาผ่านกระบวนการไพโรไลซิสเพื่อผลิตเป็นน้ำมันชีวภาพ ถ่านชีวภาพและแก๊สเชื้อเพลิง พบว่า ฝักราชพฤกษ์ให้ปริมาณผลผลิตน้ำมันชีวภาพสูงสุด คือ 33.16 wt% ตามด้วยขานอ้อยและเปลือกส้มโอ (28.40 และ 20.10 wt% ตามลำดับ) เป็นผลมาจากฝักราชพฤกษ์มีปริมาณความชื้นต่ำที่สุด จึงทำให้เกิดกระบวนการที่น้ำมันชีวภาพเปลี่ยนรูปเป็นแก๊สได้น้อยกว่าขานอ้อยและเปลือกส้มโอ พื้นที่ผิวของถ่านทั้ง 3 ชนิดมีค่าอยู่ระหว่าง 13.19 – 23.24 m<sup>2</sup>/g และถ่านที่ผลิตจากขานอ้อยมีปริมาณเถ้าต่ำที่สุด ตามด้วยฝักราชพฤกษ์และเปลือกส้มโอ

ปานใจ สื่อประเสริฐสิทธิ์ และคณะ [20] ทำการผลิตถ่านชีวภาพและเชื้อเพลิงชีวภาพจากเปลือกทุเรียน โดยการบดเปลือกทุเรียนและผสมกับตัวประสาน คือ กากไขมัน ที่อัตราส่วน โดยมวล 1: 1, 2: 1 และ 3: 1 จนถึงอัตราส่วนที่ไม่สามารถขึ้นรูปได้ เพื่อศึกษาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติทางกายภาพของถ่านชีวภาพและเชื้อเพลิงชีวภาพที่ผลิตได้ จากนั้นเปรียบเทียบมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่ง (มผช.238/2547) ผลการศึกษาพบว่า อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมระหว่างถ่านชีวภาพจากเปลือกทุเรียน: กากไขมัน มีค่าเท่ากับ 3: 1 จากการศึกษาสรุปได้ว่า ถ่านชีวภาพจากเปลือกทุเรียนจัดเป็นเชื้อเพลิงที่มีศักยภาพสูง สามารถนำมาใช้ทดแทนถ่านไม้ได้

กัญยาพร ไชยวงศ์ และ สิทธิบุรณ์ ศิริพรอัครชัย [21] ทำการทดลองเพื่อศึกษาพารามิเตอร์การผลิตถ่านชีวภาพจากเปลือกข้าวโพด เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ของการผลิตถ่านชีวภาพที่ใช้กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า ที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการผลิต (300 – 600 °C) ขนาดของวัตถุดิบ (มากกว่า 1 cm) และช่วงของการรักษาอุณหภูมิสุดท้าย (1 – 2.5 h) ผลการศึกษาพบว่า ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตถ่านชีวภาพเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิง คือ 400 °C กับวัตถุดิบขนาด 1 – 2 cm โดยใช้เวลา 2.5 h ในการรักษาอุณหภูมิสุดท้าย และอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับไนโตรเจนเพื่อปรับปรุงคุณภาพดินและกักเก็บคาร์บอน คือ 600 °C ขนาด 1 – 2 cm และใช้เวลาในการรักษาอุณหภูมิ 1 h สามารถกักเก็บคาร์บอนได้มากถึง 90.42 %

Zahoor Ahmad et al. [22] ประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพแบบใหม่ที่ได้มาจากเปลือกกล้วยและเปลือกกะหล่ำ ที่มีโพแทสเซียมเป็นองค์ประกอบหลัก สำหรับการดูดซับโลหะหนัก ได้แก่ ทองแดง แคดเมียมและตะกั่ว เพื่อศึกษาผลของค่า pH ต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก ทำการเร่งปฏิกิริยาในการไพโรไลซิส พบว่า ถ่านชีวภาพจากเปลือกกล้วยสามารถดูดซับได้ดีกว่าถ่านชีวภาพจากเปลือกกะหล่ำ เนื่องจากมีแรงดึงดูดของไฟฟ้าสถิตสูงกว่า จึงสามารถดูดซับได้ดีกว่า และความสามารถในการดูดซับโลหะหนักยังขึ้นอยู่กับค่าของ pH เนื่องจากความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า pH เพิ่มขึ้น ซึ่งถ่านชีวภาพที่ผลิตได้สามารถดูดซับตะกั่วได้มากที่สุด ตามด้วยทองแดงและแคดเมียมตามลำดับ

Ameen et al. [23] ศึกษาการกำจัดแคดเมียมออกจากสารละลายในน้ำ โดยใช้ถ่านชีวภาพจากแกลบเป็นตัวดูดซับ และใช้การทดลองแบบแบตช์ ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการผลิต คือ อุณหภูมิและเวลาในการไพโรไลซิสต่อผลผลิตถ่านชีวภาพที่ได้และอัตราการกำจัดแคดเมียม และศึกษาความสามารถในการดูดซับแคดเมียม ถ่านชีวภาพถูกเตรียมโดยการไพโรไลซิสและกระตุ้นทางเคมีกายภาพ ผลการทดลอง พบว่า อุณหภูมิและเวลาในการไพโรไลซิสเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับของถ่านชีวภาพ โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตถ่านชีวภาพ คือ 458 °C เวลาในการตอบสนอง 120 min ส่งผลให้ได้ถ่านชีวภาพ 34.5 % การกำจัดแคดเมียม 72 % และการดูดซับ 17.8 mg/g ของความสามารถในการดูดซับแคดเมียม

Zhenhao Li et al. [24] ศึกษาการเติมไนโตรเจนช่วยเพิ่มรูพรุนในถ่านชีวภาพ โดยใช้ยูเรียเป็นแหล่งไนโตรเจนและ  $\text{KHCO}_3$  เป็นตัวกระตุ้นตลอดการไพโรไลซิส ทำการศึกษาคุณสมบัติการดูดซับของถ่านชีวภาพที่เจือด้วยไนโตรเจน จากการศึกษาพบว่า อัตราส่วนของไนโตรเจนมีผลอย่าง

มากต่อโครงสร้างรูพรุนของไบโอชาร์ การเติมยูเรียในอัตราส่วนที่ต่ำช่วยให้ความสามารถในการดูดซับ มีประสิทธิภาพดีขึ้น พื้นที่ผิวจำเพาะที่เหมาะสมที่สุดของถ่านชีวภาพที่เติมไนโตรเจนอาจสูงถึง  $1693 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  ความสามารถในการดูดซับสูงสุดของฟีนอลและเมทิลีนบลู คือ  $169.0$  และ  $499.3 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  ตามลำดับ จากการเปรียบเทียบการดูดซับของตัวดูดซับต่าง ๆ พบว่า ถ่านชีวภาพ ที่กระตุ้นด้วยไนโตรเจนที่เตรียมในการศึกษานี้มีผลการดูดซับที่ดี

Farihahusnah Hussin et al. [25] ศึกษาการผลิตถ่านชีวภาพจากผลไม้ที่เสียแล้วผ่าน กระบวนการไพโรไลซิสเพื่อดูดซับโลหะหนักในน้ำเสีย เนื่องจากชนิดของวัสดุดูดซับเป็นปัจจัยที่สำคัญ ที่สุดในการกำหนดประสิทธิภาพของการดูดซับ ของเสียจากผลไม้สามารถเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ที่มี คุณค่าเช่นถ่านชีวภาพได้ เนื่องจากประกอบด้วยกลุ่มการทำงานหลายฟังก์ชัน รวมถึงหมู่คาร์บอกซิลิก และลิกนิน ซึ่งมีประสิทธิภาพในการจับโลหะหนักได้ โดยทำการศึกษาศักยภาพของผลไม้เสียประเภท ต่าง ๆ เพื่อใช้สำหรับดูดซับตะกั่ว จากไอโซเทอมสมดุลจลนพลศาสตร์การดูดซับและกลไกการดูดซับ พบว่า มีความเป็นไปได้ที่ถ่านชีวภาพจากผลไม้เสียจะสามารถดูดซับตะกั่วได้

Y.L. Tan et al. [26] ศึกษาการไพโรไลซิสแบบเร็วของเปลือกทุเรียน โดยใช้ซิลิกา-อลูมิเนียม เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และผลของอุณหภูมิตัวเร่งปฏิกิริยา ( $400 - 600 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) และอัตราส่วนตัวเร่ง ปฏิกิริยาต่อเปลือกทุเรียน (1: 30 - 3: 30) ได้ผลผลิตถ่านชีวภาพเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิตัวเร่งปฏิกิริยา ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากเกิดการคายน้ำจำนวนมาก ตัวเร่งปฏิกิริยาซิลิกา-อลูมิเนียมทำงานได้ดีใน กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วของเปลือกทุเรียนและอาจปรับสภาพได้ดีตามผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ

Sabolc Pap et al. [27] ศึกษาการสังเคราะห์ถ่านชีวภาพที่มีฟังก์ชันที่มีประสิทธิภาพสูงจาก ชีวมวล ของเสียในอุตสาหกรรมผลไม้เพื่อกำจัดโครเมียมและตะกั่ว โดยใช้เมล็ดพลัมและแอปเปิ้ลคอก ผลิตเป็นถ่านชีวภาพ เพื่อประเมินความสามารถในการดูดซับตะกั่วและแคดเมียม โดยใช้กระบวนการ ไพโรไลซิสและกระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริก จากนั้นทำการวิเคราะห์ฟังก์ชันพื้นผิวเพื่อศึกษา ลักษณะเฉพาะและการดูดซับโดยใช้พารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน จากการวิเคราะห์ผลโดยใช้แบบจำลอง จลนพลศาสตร์และไอโซเทอมการดูดซับเพื่อสรุปผล พบว่า พื้นผิวของถ่านชีวภาพมีกลุ่มฟังก์ชันที่ ประกอบด้วยกำมะถัน ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มพันธะและประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนัก ดังนั้น ถ่านชีวภาพที่ผลิตได้จึงมีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักออกจากสารละลายน้ำได้

Huosheng Li et al. [28] ผลิตถ่านชีวภาพจากเปลือกแตงโม เพื่อใช้เป็นตัวดูดซับที่สามารถ นำกลับมาใช้ใหม่ได้ เพื่อกำจัดแคลเซียมออกจากน้ำเสียอย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้การไพโรไลซิส ที่อุณหภูมิ  $500 \text{ }^{\circ}\text{C}$  พบว่า มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดแคลเซียมมากที่สุดในช่วง pH 4 - 12 ตามด้วยถ่านชีวภาพที่ กระตุ้นด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และการกระตุ้นด้วย กรดไฮโดรคลอริก ความสามารถในการดูดซับแคลเซียมสูงสุดอยู่ที่  $178.4 \text{ mg/g}$  ซึ่งสูงกว่าถ่านชีวภาพ

ชนิดอื่น ๆ โดยถ่านชีวภาพที่ได้จากเปลือกแตงโมจะทำหน้าที่เป็นเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และมีความสามารถในการกำจัดแผลเยี่ยมสูง

Guangcai Tan et al. [29] ศึกษาการดูดซับปรอทและอะทราซีนโดยถ่านชีวภาพที่ถูกกระตุ้นและถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในสารละลายน้ำ โดยผลิตถ่านชีวภาพจากฟางข้าวโพดและใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตถ่านชีวภาพที่ถูกกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ ถ่านชีวภาพที่ถูกกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านกัมมันต์ เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับปรอทและอะทราซีนในน้ำ จากนั้นทำให้ชุ่มด้วยกัมมะถันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดปรอทและอะทราซีน จากการทดลองสรุปได้ว่าถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับที่ดีที่สุด เนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงและมีรูพรุนจำนวนมาก

Amali Herath et al. [30] ทำการผลิตถ่านชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิแบบเร็ว (900 – 1000 °C) และกระตุ้นด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียม ตะกั่วและแคดเมียมในน้ำ จากการวิเคราะห์ BET พบว่า การกระตุ้นด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวมากขึ้นเป็น 1049 m<sup>2</sup>/g และปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้นถึงสามเท่า ความสามารถในการกำจัดโครเมียม ตะกั่วและแคดเมียม คือ 140 127.2 และ 29 m<sup>2</sup>·g<sup>-1</sup> ตามลำดับ และเกิดขึ้นที่ค่า pH 2 5 และ 6 ตามลำดับ

## บทที่ 3

### อุปกรณ์และวิธีการ

#### 3.1 อุปกรณ์การทดลอง

- 3.1.1 เครื่องอบลมร้อน (Hot Air Oven) ยี่ห้อ Binder รุ่น FD series
- 3.1.2 เต้าเผาไฟฟ้า
- 3.1.3 ถังแก๊สไนโตรเจน
- 3.1.4 เครื่องบดผงละเอียด ยี่ห้อ Spring Green Evolution รุ่น PG300
- 3.1.5 ตะแกรงร่อน (Test sieve) ขนาด 425  $\mu\text{m}$
- 3.1.6 เครื่องกวนสาร (Magnetic stirrer) ยี่ห้อ IKA รุ่น C-MAG HS7
- 3.1.7 เครื่องเขย่าสาร (Shaker) ยี่ห้อ MIULAB รุ่น ES-60
- 3.1.8 เครื่องปั่นเหวี่ยงสาร (Centrifuge) ยี่ห้อ MIULAB รุ่น MT-45
- 3.1.9 กระดาษกรอง Nylon membrane filters ขนาด 0.2  $\mu\text{m}$
- 3.1.10 กระดาษกรอง Glass Microfiber Filters ขนาด 0.7  $\mu\text{m}$
- 3.1.11 ชุดกรองสุญญากาศ
- 3.1.12 เครื่องวัด pH
- 3.1.13 เครื่อง Inductively Coupled Plasma - Optical Emission Spectrometer (ICP-OES)

#### 3.2 วัสดุในการทดลอง

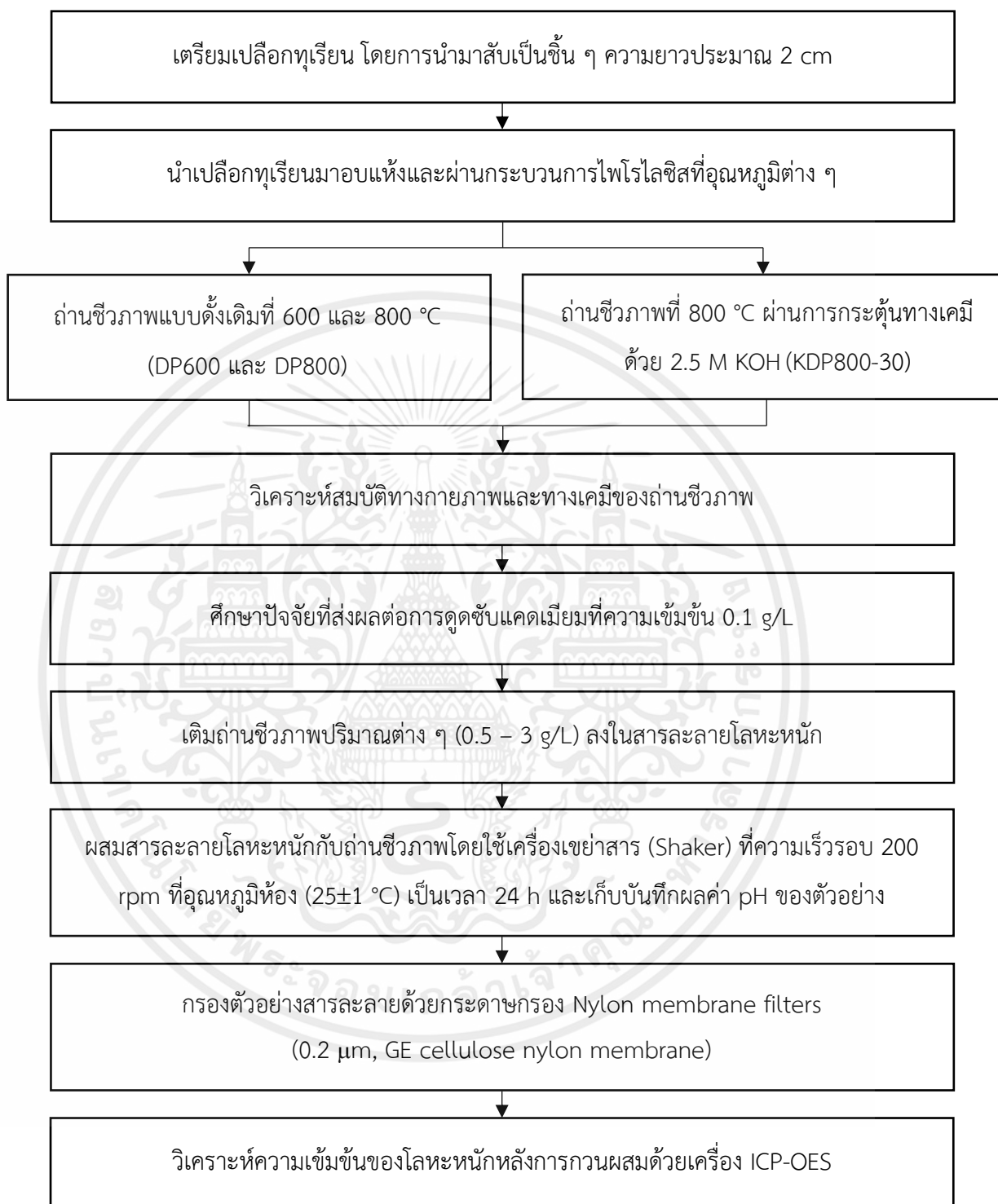
สารเคมีทั้งหมดเป็นเกรดวิเคราะห์ ได้แก่

- 3.2.1 น้ำ DI
- 3.2.2 สารละลายแคดเมียม (Cd)
- 3.2.3 สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)
- 3.2.4 กรดไฮโดรคลอริก (HCl)
- 3.2.5 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

#### 3.3 วัตถุดิบ

เก็บเปลือกทุเรียนซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้ง จากบริษัททะเลทรัพย์พีรช ทราย จำกัด จังหวัดชุมพร

### 3.4 ขั้นตอนการทำกรวิจัย



รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการทำกรวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 การศึกษาการผลิตถ่านชีวภาพจากเปลือกทุเรียนหมอนทองด้วยกระบวนการไพโรไลซิส

การผลิตถ่านชีวภาพ เพื่อศึกษาสมบัติทางเคมีและกายภาพของถ่านชีวภาพในแต่ละช่วงอุณหภูมิไพโรไลซิส (600 – 800 °C) และช่วงเวลาต่าง ๆ (30 – 90 min)

3.5.1 เตรียมเปลือกทุเรียน โดยการนำมาสับเป็นชิ้น ๆ ความยาวประมาณ 2 cm อบเปลือกทุเรียนด้วยตู้อบลมร้อน ที่ 70 °C จนมีน้ำหนักคงที่

3.5.2 นำเปลือกทุเรียนที่ได้มาเผาในเตาเผาไฟฟ้าด้วยกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 600 และ 800 °C โดยมีอัตราการให้ความร้อน 5 °C/min และอัตราการไหลของไนโตรเจน 200 ml/min เมื่อมีอุณหภูมิสูงสุด ให้ความร้อนต่อเป็นเวลา 30 60 และ 90 min

3.5.3 บดตัวอย่างถ่านชีวภาพที่ได้จากการเผาด้วยเครื่องบดผงละเอียด และ sieve ด้วยตะแกรงขนาด 425 µm

3.5.4 ปรับ pH ของถ่านชีวภาพ โดยใช้กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 M จนมีค่า pH เป็นกลาง (pH 7)

3.5.5 นำตัวอย่างที่ได้จากการเผาตัวอย่างละ 1 กรัม ทั้ง 6 ตัวอย่าง วิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของถ่านด้วยเทคนิคต่าง ๆ เช่น Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) Brunauer–Emmett–Teller (BET) FTIR และ CHNS

### 3.6 การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาในกระบวนการไพโรไลซิสที่เหมาะสมต่อการดูดซับแคดเมียม

3.6.1 ชั่งถ่านชีวภาพที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 600 และ 800 °C ที่ระยะเวลาในกระบวนการไพโรไลซิส 30 60 และ 90 min อย่างละ 0.02 g ใส่ลงในหลอดเซนต์ปีทาร์กขนาด 50 ml

3.6.2 เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียมที่ 0.1 g/L โดยการเจือจางสารละลายแคดเมียมที่มีความเข้มข้น 1 g/L ด้วยการเติมสารละลายแคดเมียมปริมาตร 30 ml ลงในน้ำกลั่นปริมาตร 270 ml จากนั้นกวนผสมสารละลายแคดเมียมกับน้ำกลั่นด้วยเครื่องกวนสาร

3.6.3 ปิเปตสารละลายแคดเมียมปริมาตร 20 ml ใส่ลงในหลอดเซนต์ปีทาร์กพร้อมปิดฝา

3.6.4 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 rpm อุณหภูมิห้อง (25±1 °C) เป็นเวลา 24 h และเก็บบันทึกผลค่า pH ของตัวอย่าง

3.6.5 กรองถ่านชีวภาพที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 600 และ 800 °C ด้วยกระดาษกรอง Nylon membrane filters ขนาด 0.2 µm

3.6.6 นำสารละลายแคดเมียมที่ได้จากการกรองในข้อ 5) ใส่ขวดพลาสติก และวิเคราะห์ความเข้มข้นของแคดเมียมด้วยเครื่อง ICP-OES

3.6.7 ทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 2 ชุดการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในกระบวนการโฟโวลซิสมีผลต่อการดูดซับแคดเมียม โดยนำผลการทดลองที่ให้ประสิทธิภาพของการดูดซับแคดเมียมดีที่สุดจากข้อก่อนหน้ามาดำเนินการทดลองสำหรับการกระตุ้นทางเคมีด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

### 3.7 การปรับปรุงคุณสมบัติถ่านชีวภาพ

การปรับปรุงคุณสมบัติถ่านชีวภาพโดยเลือกถ่านที่มีคุณสมบัติดีที่สุดจากการวิเคราะห์ โดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่อัตราส่วนถ่านชีวภาพต่อโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 2.5 M

3.7.1 เตรียมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2.5 M โดยนำโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ปริมาณ 21.41 g ถ่านชีวภาพ DP800-30 ปริมาณ 5 g และน้ำกลั่นปริมาตร 100 ml ใส่ลงในบีกเกอร์

3.7.2 ทำการกวนผสมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เป็นเวลา 4 h ที่อุณหภูมิห้อง ( $25 \pm 1$  °C)

3.7.3 กรองถ่านชีวภาพออกจากสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์โดยใช้กระดาษกรอง Glass Microfiber Filters ขนาด 0.7  $\mu\text{m}$  ทำการซั่งน้ำหนักแล้วบันทึกผล

3.7.4 นำถ่านชีวภาพที่ได้มารวมกัน แล้วนำไปอบแห้งด้วยเครื่องอบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 24 h

3.7.5 โฟโวลซิสที่อุณหภูมิ 800 °C โดยมีอัตราการให้ความร้อน 5 °C/min และอัตราการไหลของไนโตรเจน 200 ml/m เมื่อมีอุณหภูมิสูงสุด ให้ความร้อนต่อเป็นเวลา 30 min

3.7.6 ถ่านชีวภาพที่ถูกกระตุ้นถูกทำให้เย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้อง ( $25 \pm 1$  °C) จากนั้นล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 0.1 M หลายครั้งจนมีค่า pH เป็น 7

3.7.7 กรองถ่านชีวภาพโดยใช้กระดาษกรอง Glass Microfiber Filters ขนาด 0.7  $\mu\text{m}$  และทำการวัดค่า pH

3.7.8 กรองถ่านชีวภาพโดยใช้กระดาษกรอง Glass Microfiber Filters ขนาด 0.7  $\mu\text{m}$  อีกครั้ง จากนั้นซั่งน้ำหนักแล้วบันทึกผล

3.7.9 นำไปอบแห้งด้วยเครื่องอบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 24 h ทำการซั่งน้ำหนักแล้วบันทึกผล

3.7.10 ถ่านชีวภาพที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ถูกกำหนดให้เป็น KDP800-30

3.7.11 ทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 2 ชุดการทดลอง

### 3.8 การศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับแคดเมียมด้วยถ่านชีวภาพ

3.8.1 ชุดการทดลองที่ 1 เตรียมสารละลายแคดเมียมที่ความเข้มข้น 0.1 g/L

3.8.1.1 เตรียมสารละลายแคดเมียมปริมาตร 20 ml ใส่ลงในหลอดเซนติฟิวก์ จำนวน 5 หลอด แล้วนำไปเขย่าในเครื่องเขย่าเป็นเวลา 0 60 120 720 และ 1440 min

3.8.1.2 เมื่อครบเวลาที่กำหนดแล้ว ทำการวัดค่า pH แล้วบันทึกผล จากนั้นเก็บสารละลายแคดเมียมที่ได้ใส่ขวดพลาสติก เพื่อส่งวิเคราะห์ความเข้มข้นของแคดเมียม

3.8.2 ชุดการทดลองที่ 2 เตรียมสารละลายแคดเมียมที่ความเข้มข้น 0.1 g/L ถ่านชีวภาพ และถ่านชีวภาพที่กระตุ้นด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ปริมาณ 0.01 g

3.8.2.1 เตรียมสารละลายแคดเมียมปริมาตร 20 ml และถ่านชีวภาพ (DP600-30, DP600-60, DP600-90, DP800-30, DP800-60, DP800-90, และ KDP800-30) ปริมาณ 0.01 g ใส่ลงในหลอดเซนติฟิวก์

3.8.2.2 นำไปเขย่าในเครื่องเขย่าเป็นเวลา 30 60 120 360 720 และ 1440 min

3.8.2.3 เมื่อครบเวลาที่กำหนดแล้ว ทำการวัดค่า pH แล้วบันทึกผล จากนั้นกรองด้วยกระดาษกรอง Nylon membrane filters ขนาด 0.2  $\mu\text{m}$

3.8.2.4 เก็บสารละลายแคดเมียมที่ได้จากการกรอง ใส่ขวดพลาสติก เพื่อส่งวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมด้วยเครื่อง ICP-OES

3.8.2.5 ทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 2 ชุดการทดลอง

### 3.9 การศึกษาอิทธิพลของค่า pH และปริมาณถ่านชีวภาพที่ใช้ในการดูดซับแคดเมียม

3.9.1 เตรียมถ่านชีวภาพ (DP800-30) ปริมาณต่าง ๆ (0 0.5 1 2 และ 3 g/L) ใส่ลงในหลอดเซนติฟิวก์ อย่างละ 3 หลอด

3.9.2 เตรียมสารละลายแคดเมียมปริมาตร 100 ml จำนวน 3 ปีกเกอร์

3.9.3 ทำการปรับค่า pH ของสารละลายแคดเมียมในแต่ละปีกเกอร์ ให้มีค่า pH เป็น 3 5 และ 7

3.9.4 ปิเปตสารละลายแคดเมียมที่ค่า pH ต่าง ๆ ปริมาตร 20 ml ใส่ลงในหลอดเซนติฟิวก์ ในข้อที่ 3.9.1

3.9.5 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าสารเป็นเวลา 720 min

3.9.6 เมื่อครบเวลาที่กำหนดแล้ว ทำการวัดค่า pH แล้วบันทึกผล จากนั้นกรองด้วยกระดาษกรอง Nylon membrane filters ขนาด 0.2  $\mu\text{m}$

3.9.7 เก็บสารละลายแคดเมียมที่ได้จากการกรอง ใส่ขวดพลาสติก เพื่อส่งวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมด้วยเครื่อง ICP-OES

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.9.8 ทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 2 ชุดการทดลอง

### 3.10 การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อการดูดซับแคดเมียมด้วยถ่านชีวภาพ

3.10.1 เตรียมสารละลายแคดเมียมที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (10 25 50 75 และ 100 mg/L) ปริมาตร 20 ml และเตรียมถ่านชีวภาพ (DP800-30) ปริมาณ 0.02 g ใส่ลงในหลอดเซนติฟิวจ์

3.10.2 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าสารเป็นเวลา 720 m โดยกำหนดอุณหภูมิเป็น 30 40 และ 50 °C

3.10.3 เมื่อครบเวลาที่กำหนดแล้ว ทำการวัดค่า pH แล้วบั่นที่กผล จากนั้นกรองด้วยกระดาษกรอง Nylon membrane filters ขนาด 0.2  $\mu\text{m}$

3.10.4 เก็บสารละลายแคดเมียมที่ได้จากการกรอง ใส่ขวดพลาสติก เพื่อส่งวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมด้วยเครื่อง ICP-OES

3.10.5 ทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 2 ชุดการทดลอง

## บทที่ 4

### ผลและวิจารณ์ผล

การศึกษาและการผลิตถ่านชีวภาพจากเปลือกทุเรียนหมอนทองโดยใช้อุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิสที่ 600 และ 800 °C แล้วให้ความร้อนต่อเป็นเวลา 30 60 และ 90 min และทดสอบลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านชีวภาพที่ได้ก่อนนำไปใช้เป็นวัสดุดูดซับโลหะหนัก ซึ่งประกอบไปด้วยปริมาณพื้นที่ผิวของรูพรุน ลักษณะพื้นผิวรูพรุน ขนาดรูพรุน รูปร่างและลักษณะของถ่านชีวภาพ รวมไปถึง ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ เช่น ปริมาณถ่านชีวภาพ (Adsorbent dosage) ระยะเวลาการสัมผัส (Contraction time) และ ค่า pH ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมด้วยตัวอย่างถ่านชีวภาพที่อุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิส 600 และ 800 °C และให้ความร้อนต่อเป็นเวลาต่าง ๆ โดยมีผลการศึกษาดังนี้

#### 4.1 ร้อยละเอียดของการผลิต

นำเปลือกทุเรียนซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้ง จากบริษัททะเลทรัพย์ พีริชตรา ย จำกัด จังหวัดชุมพร มาล้างทำความสะอาด สับเป็นชิ้นเล็ก ๆ ประมาณ 2 cm จากนั้นนำเปลือกทุเรียนที่ได้ไปอบด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C จนมีน้ำหนักคงที่ เปลือกทุเรียนที่ได้จะมีลักษณะสีน้ำตาล ดังรูปที่ 4.1 (ก) จากนั้นนำเปลือกทุเรียนที่ผ่านการอบมาเข้าสู่กระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 600 และ 800 °C และให้ความร้อนต่อเป็นเวลาต่าง ๆ จากนั้นนำไปบดด้วยเครื่องบดผงละเอียดและ sieve ด้วยตะแกรง ขนาด 425  $\mu\text{m}$  ถ่านชีวภาพที่ได้จะมีลักษณะเป็นผงละเอียดสีดำดังรูปที่ 4.1 (ข)



(ก) เปลือกทุเรียนหลังผ่านการอบ



(ข) ถ่านชีวภาพ

รูปที่ 4.1 ถ่านชีวภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร้อยละการผลิตถ่านชีวภาพที่ผลิตโดยกระบวนการไพโรไลซิส แสดงให้เห็นได้ว่า ปริมาณของเปลือกทุเรียนที่ได้หลังจากการอบและนำไปเผา มีน้ำหนักที่เปลี่ยนไปตามเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา ซึ่งเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 °C ที่เวลาต่าง ๆ จะเห็นได้ว่า ถ่านชีวภาพที่ได้มีน้ำหนักมากกว่า ส่วนที่อุณหภูมิ 800 °C น้ำหนักไม่คงที่ ซึ่งอาจมีปัจจัยที่ทำให้น้ำหนักไม่คงที่ เช่น ปริมาณของ CO<sub>2</sub> ขณะกระบวนการไพโรไลซิส [18] แสดงดังตารางที่ 4.1

ผลของค่า pH ในตารางที่ 4.1 พบว่า มีค่า pH ที่แตกต่างกันในแต่ละสารตัวอย่าง แต่ไม่มากและยังอยู่ในช่วงค่า pH ที่เป็นกลาง ซึ่งค่า pH ที่แตกต่างกันในแต่ละสารตัวอย่างเป็นผลมาจากปริมาณของธาตุประกอบของสารตัวอย่างที่แตกต่างกัน เนื่องมาจากมีแร่ธาตุอัลคาไล (K, Ca, Mg) เป็นองค์ประกอบในถ่านชีวภาพ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่ได้จากภาพจากกล้อง FESEM (ตารางที่ 4.1) ประกอบกัน โดย DP800-30 มีค่า pH สูงที่สุด (7.29) สอดคล้องกับผลในตารางที่ 4.3 ที่พบธาตุประกอบคาร์บอน (C) สูง (78.60%) และพบธาตุประกอบแคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) และโพแทสเซียม (K) ที่เป็นสาเหตุให้ค่า pH สูงใน DP800-30

ตารางที่ 4.1 ร้อยละของการผลิต

Pyrolysis temperature	Time (min)	Absorbents	Yield (%)	pH
600 °C	30	DP600-30	27.90	7.16
	60	DP600-60	29.22	7.10
	90	DP600-90	29.37	6.81
800 °C	30	DP800-30	30.00	7.29
	60	DP800-60	21.40	6.78
	90	DP800-90	28.26	6.71

## 4.2 ผลการวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุน

เพื่อแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของขนาดพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของถ่านชีวภาพที่อุณหภูมิและเวลาที่ต่างกัน ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถบ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซับได้ ซึ่งทำการศึกษาโดยใช้เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและความพรุนของวัสดุ (BET) ผลการวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุน ในตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณพื้นที่ผิวรูพรุนรวม ขนาดรูพรุนเฉลี่ยสำหรับการดูดซับและปริมาตรรูพรุนของสารตัวอย่างมีขนาดของรูพรุนที่แตกต่างกัน โดย DP600-30 มีพื้นที่ผิวรูพรุนรวมสูงสุด คือ 5.74 m<sup>2</sup>/g และเมื่อเวลาในการไพโรไลซิสเพิ่มขึ้นจาก 30 เป็น 60 และ 90 นาทีส่งผลให้พื้นที่ผิวมีปริมาณลดลงเป็น 2.16 m<sup>2</sup>/g และ 1.07 m<sup>2</sup>/g ตามลำดับ ในขณะที่อุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไพโรไลซิส 800 °C มีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาในการไพโรไลซิสเพิ่มขึ้น DP600-30 และ DP600-60 มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยสำหรับการดูดซับมากที่สุด (65.67 nm และ 64.15 nm ตามลำดับ) ส่วน DP600-90 และ DP800-90 มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยสำหรับการดูดซับน้อยที่สุด (3.85 nm และ 4.76 nm ตามลำดับ) ในขณะที่ DP800-90 และ DP600-30 พบปริมาณรูพรุนมากที่สุด (0.001 cm<sup>3</sup>/g และ 0.001 cm<sup>3</sup>/g ตามลำดับ) และที่ DP600-30 มีขนาดรูพรุนใหญ่ที่สุด ตามด้วย DP600-60 และ DP600-90 มีขนาดของรูพรุนเล็กที่สุด (65.67 nm, 64.15 nm และ 3.85 nm ตามลำดับ) โดยที่ ปริมาณหรือประสิทธิภาพการดูดซับขึ้นอยู่กับขนาดรูพรุนของสารตัวอย่าง สัดส่วนของพื้นที่ผิวรูพรุน รวมขนาดเล็ก ขนาดกลางและขนาดใหญ่ ต่อพื้นที่ผิวรูพรุนรวม หากพื้นที่ผิวรูพรุนรวมมีปริมาณสูงจะ ส่งผลให้การดูดซับมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น แต่พื้นที่ผิว ไม่ได้เป็นเหตุผลหลักสำหรับในการเพิ่ม ประสิทธิภาพตัวดูดซับเพราะมีเหตุผลอื่น ๆ อีกเช่น ปริมาณของแร่ธาตุ และหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ก็มีอิทธิพล และบทบาทสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ

**ตารางที่ 4.2** ผลการวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของถ่านชีวภาพที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่าง ๆ

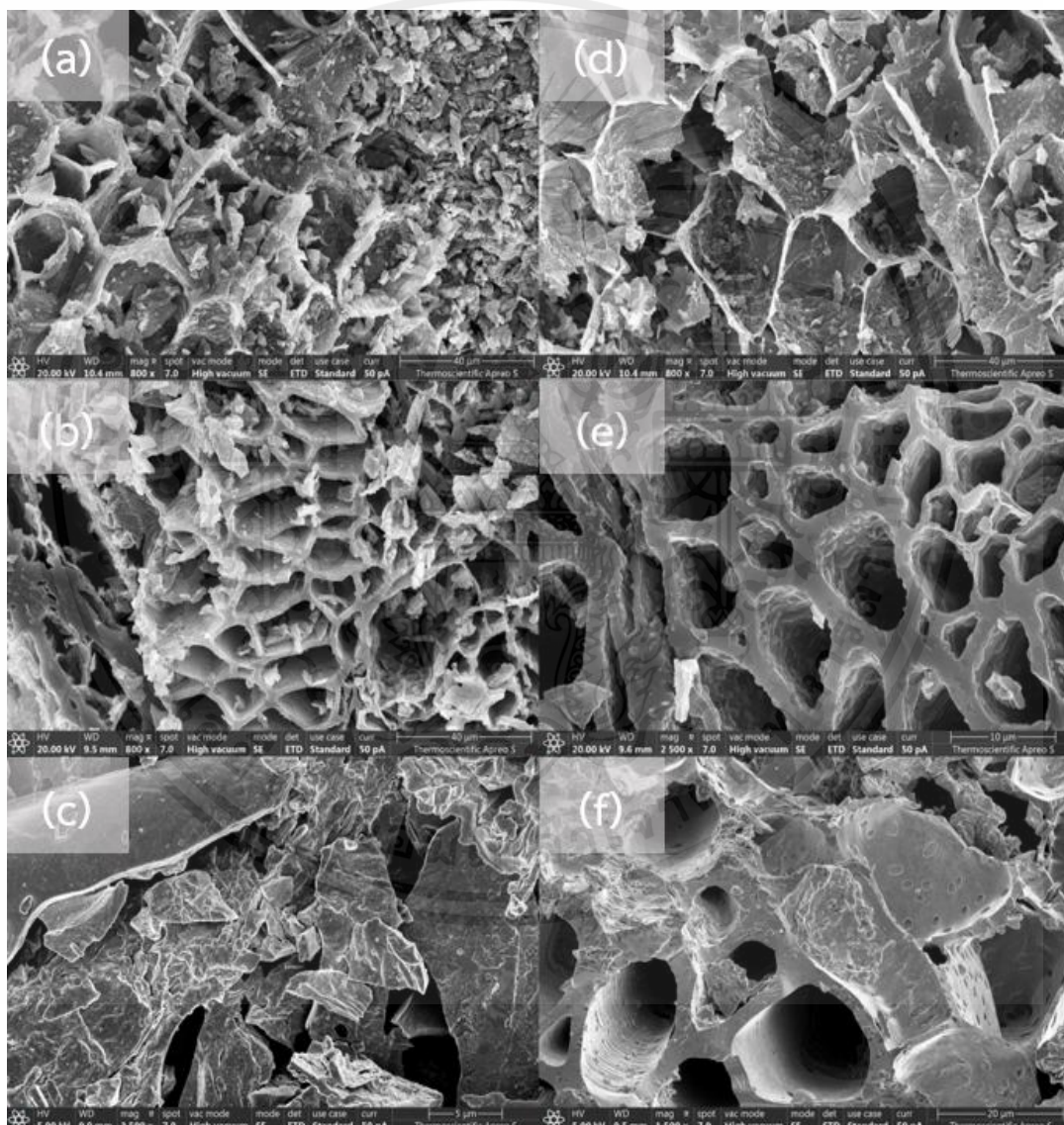
Absorbents	Surface area (m <sup>2</sup> /g)	Adsorption average pore width (nm)	Total volume in pores (cm <sup>3</sup> /g)
DP600-30	5.74	65.67	0.0011
DP600-60	2.16	64.15	0.0006
DP600-90	1.07	3.85	0.0005
DP800-30	1.51	19.22	0.0007
DP800-60	1.73	16.41	0.0008
DP800-90	2.08	4.76	0.0012

### 4.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology)

จากผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field emission scanning electron microscope: FESEM) เพื่อศึกษาลักษณะพื้นที่ผิวถ่านชีวภาพที่อุณหภูมิและระยะเวลาในกระบวนการไพโรไลซิสที่ต่างกัน โดยการสังเกตจากขนาดรูพรุนและการเรียงตัวของพื้นผิว การศึกษาจึงใช้ FESEM ด้วยกำลังขยายที่ 2,500 เท่า เพื่อให้เห็นภาพการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน แสดงในรูปที่ 4.2 จากการศึกษาเห็นได้ว่าลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างของแต่ละตัวอย่างมีลักษณะที่แตกต่างกัน พบว่า DP800-90 มีลักษณะพื้นผิวที่เรียบและไม่ขรุขระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเทียบกับตัวอย่างอื่นที่มีพื้นที่ผิวที่ค่อนข้างต่ำ ซึ่งแสดงให้เห็นพื้นผิวในโครงสร้างแข็งขนาดกะทัดรัดที่มีเกล็ดเรียบ ในทางกลับกันพื้นผิวที่ DP600-30 ปรากฏรูพรุนที่ขรุขระ มีโครงข่ายรูพรุนและรอยแตกที่ซับซ้อน ซึ่งอธิบายได้ว่าที่อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้พื้นที่เรียบขึ้น และเมื่อเพิ่มระยะเวลาการเผาจะทำให้โครงสร้างของถ่านชีวภาพมีโครงสร้างที่แข็งแรงขึ้น ซึ่งพื้นที่ผิวที่ขรุขระเกินไปจะทำให้ดูดซับได้ไม่ดี และเมื่อมีโครงสร้างที่แข็งแรงเกินไปก็จะดูดซับได้ไม่ดีเช่นกัน ตัวอย่าง DP800-30 มีพื้นที่ผิวเป็นระเบียบ รูพรุนมีขนาดเล็ก มีปริมาตรเพิ่มขึ้นและเห็นรูพรุนชัดเจน ดังนั้นเมื่อปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้นอาจส่งผลทำให้ถ่านชีวภาพมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.2 โครงสร้างพื้นผิวโดยใช้กล้อง FESEM ของตัวอย่างถ่านชีวภาพต่าง ๆ

โดยที่ (a) DP600-30 (b) DP600-600 (c) DP600-90

(d) DP800-30 (e) DP800-60 (f) DP800-90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์ธาตุประกอบ จากตารางที่ 4.3 พบว่า DP800-30 มีปริมาณคาร์บอนสูงสุด (78.60%) และปริมาณออกซิเจนและแมกนีเซียมสูงสุด (24.40% และ 1.30% ตามลำดับ) พบที่ตัวอย่าง DP600-30 และพบปริมาณโพแทสเซียมและแคลเซียมสูงสุดใน DP600-90 (9.2% และ 1.20% ตามลำดับ) ในขณะที่พบปริมาณฟอสฟอรัสเท่ากัน (0.60%) ใน DP600-30, DP600-90 และ DP800-30 ซึ่งปริมาณคาร์บอนที่สูงอาจมีผลต่อคุณสมบัติการดูดซับสารปนเปื้อน นอกจากจะช่วยเร่งปฏิกิริยาในระหว่างการไพโรไลซิสแล้ว อาจทำหน้าที่เป็นสารตั้งต้นสำหรับการก่อตัวของกลุ่มฟังก์ชันที่พื้นผิวคาร์บอนและพัฒนาโครงสร้างแบบพรุนของตาข่ายคาร์บอนได้

ซึ่งอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสจะส่งผลต่อธาตุประกอบในวัสดุซึ่งจากกระบวนการไพโรไลซิสจะพบธาตุที่ไม่ใช่คาร์บอนซึ่งจะเกิดการแตกตัวทางเคมีออกมาในรูปของก๊าซ เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน และไนโตรเจน เป็นต้น ซึ่งคาร์บอนอิสระ (Free – Radical Carbon) ที่มีอยู่นั้น จะเกิดการรวมกลุ่มกันในรูปของถ่านชีวภาพ ซึ่งจากตารางที่ 4.3 จะเห็นธาตุที่ต่างกันไม่มาก เพราะอุณหภูมิทำให้เกิดการแตกต่างทางเคมีมีลักษณะคล้ายกัน และเมื่อเวลาผ่านไปจะทำให้ปริมาณของธาตุมีปริมาณที่แตกต่างกัน

**ตารางที่ 4.3** ผลการวิเคราะห์ธาตุประกอบที่อุณหภูมิ 600 และ 800 °C เป็นเวลา 30 60 และ 90 min

Elemental	DP600-30 (wt%)	DP600-60 (wt%)	DP600-90 (wt%)	DP800-30 (wt%)	DP800-60 (wt%)	DP800-90 (wt%)
C	65.60	71.10	62.60	78.60	68.40	70.20
O	24.40	20.10	24.10	15.70	21.60	22.80
K	7.90	7.60	9.20	3.90	9.00	5.10
Mg	1.30	0.60	1.10	0.70	0.50	0.90
P	0.60	0.30	0.60	0.60	0.40	0.40
Ca	0.30	0.30	1.20	0.50	0.20	0.20
N	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

\*\* หมายเหตุ C คือ คาร์บอน O คือ ออกซิเจน K คือ โพแทสเซียม Mg คือ แมกนีเซียม P ฟอสฟอรัส Ca คือแคลเซียม และ N คือ ไนโตรเจน

#### 4.4 ประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมของสารตัวอย่างต่าง ๆ

ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมของสารตัวอย่างต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.4 จากการวิเคราะห์พบว่า DP800-30 มีความสามารถในการดูดซับแคดเมียมสูงสุด (97.71%) ซึ่งเป็นผลมาจากตารางที่ 4.3 ที่ DP800-30 มีปริมาณธาตุประกอบคาร์บอนสูงสุด (78.60%) ซึ่งปริมาณคาร์บอนที่มากจะทำหน้าที่เป็นสารตั้งต้นสำหรับการก่อตัวของกลุ่มฟังก์ชันที่พื้นผิวคาร์บอนและพัฒนาโครงสร้างแบบพรุนของตาข่ายคาร์บอนได้ และสังเกตได้ว่า DP800-30 มีรูพรุนขนาดเล็กและไม่หนาเกินไปเป็นจำนวนมาก ซึ่งเหมาะแก่การดูดซับโลหะหนักเป็นอย่างมาก ดังนั้น ในการวิเคราะห์ครั้งถัดไปจึงเลือกใช้ DP800-30

ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมของสารตัวอย่างต่าง ๆ

Absorbents	Removal efficiency (%)
control	100
DP600-30	84.48
DP600-60	93.68
DP600-90	51.48
DP800-30	97.71
DP800-60	82.37
DP800-90	42.38

#### 4.5 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุ Carbon , Hydrogen , Nitrogen และ Sulphur

ปริมาณธาตุต่าง ๆ ในแต่ละสารตัวอย่างแสดงในตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ CHNS พบว่า สารตัวอย่างต่าง ๆ มีปริมาณ CHNS ใกล้เคียงกัน โดยพบปริมาณ C มากที่สุดใน DP800-60 (71.04%) พบปริมาณ H สูงสุดที่ DP600-30 (1.51%) ส่วนปริมาณ N ใกล้เคียงกันมาก อยู่ในช่วง 0.88 – 1.06% และพบปริมาณซัลเฟอร์น้อยมาก (0.00 – 0.08%) ซึ่งปริมาณของธาตุ C ที่สูงอาจมีผลต่อคุณสมบัติการดูดซับที่ดี นอกจากผลของการเร่งปฏิกิริยาในระหว่างไพโรไลซิสแล้ว ปริมาณ C ที่สูง ยังช่วยเพิ่มพื้นที่รูพรุนได้ดี ซึ่งจะส่งผลให้มีประสิทธิภาพการดูดซับที่ยิ่งขึ้นอีกด้วย

ตารางที่ 4.5 ปริมาณธาตุประกอบ Carbon , Hydrogen , Nitrogen และ Sulphur ของสารตัวอย่างต่าง ๆ

Absorbents	Element (%)			
	Carbon	Hydrogen	Nitrogen	Sulphur
DP600-30	69.46	1.51	0.88	0.00
DP600-60	70.31	1.36	0.97	0.02
DP600-90	70.09	1.37	1.06	0.08
DP800-30	70.36	0.92	0.90	0.00
DP800-60	71.04	0.86	0.89	0.00
DP800-90	68.29	0.85	0.80	0.02

#### 4.6 ผลการทดลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ

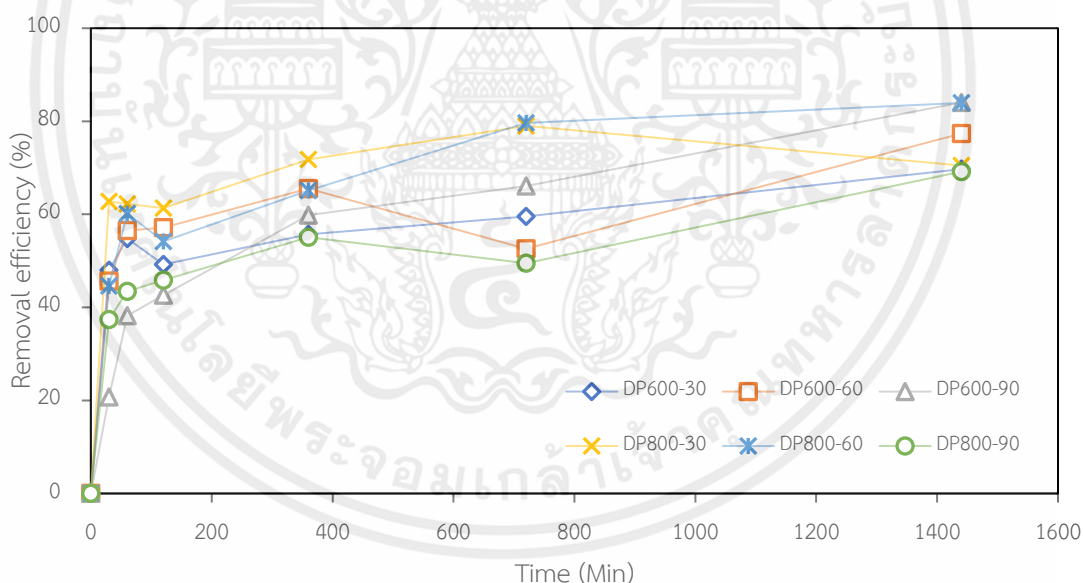
การศึกษาเวลาในการดูดซับเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับแคดเมียม ซึ่งผลของระยะเวลาของการเขย่ามีผลต่อการดูดซับ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ชัดว่า DP800-30 ที่เวลา 720 min สามารถกำจัดแคดเมียมได้มากที่สุดถึง 79.01 % ซึ่งจากการทดลองจลนพลศาสตร์การดูดซับในเวลาที่แตกต่างกัน จะเห็นได้ว่าการดูดซับจะดูดซับได้ดีขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและเริ่มช้าลงเมื่อเวลาผ่านไป 120 min และเข้าสู่ภาวะสมดุลที่ระยะเวลา 720 min จึงเลือกใช้ระยะเวลาที่ 720 min และจะเห็นได้ว่า DP800-30 มีประสิทธิภาพในการดูดซับที่ดีที่สุดถึง 85.47 mg/g (รูปที่ 4.4) นอกจากนี้จะเห็นได้ความสามารถในการดูดซับแคดเมียมของถ่านชีวภาพจะขึ้นอยู่กับค่า pH ด้วย เมื่อค่า pH มีค่าเข้าใกล้ 7 จะมีประสิทธิภาพดีกว่าค่า pH ที่เป็นกรดดังแสดงในรูปที่ 4.5 ดังนั้น จึงได้ทำการศึกษาอิทธิพลของค่า pH ที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับแคดเมียมในหัวข้อถัดไป

นอกจากนี้จากการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับแคดเมียมที่เวลาต่าง ๆ สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับที่เวลาใด ๆ กับเวลาได้ดังแสดงในรูปที่ 4.3 จากการนำข้อมูล  $q_t$  และ  $t$  ที่ภาวะสมดุลของการดูดซับแคดเมียมของถ่านชีวภาพต่าง ๆ ด้วยแบบจำลอง pseudo-first order และ pseudo-second order เพื่อให้ทราบถึงกลไกการดูดซับซึ่งเป็นการถ่ายโอนมวลสารระหว่างสารถูกดูดซับและวัสดุดูดซับ โดยแบบจำลองทั้ง 2 แบบตั้งบนสมมติฐานว่ากระบวนการดูดซับและการคายเป็นปฏิกิริยาเคมีเทียม (pseudochemical reaction) และอัตราการดูดซับขึ้นกับตำแหน่งในการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุดูดซับที่ยังไม่ถูกครอบครอง ตามสมการที่ 2.5 และ 2.6 ตามลำดับ โดยใช้การคำนวณแบบ Nonlinear Regression ได้ข้อมูลพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังแสดงใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

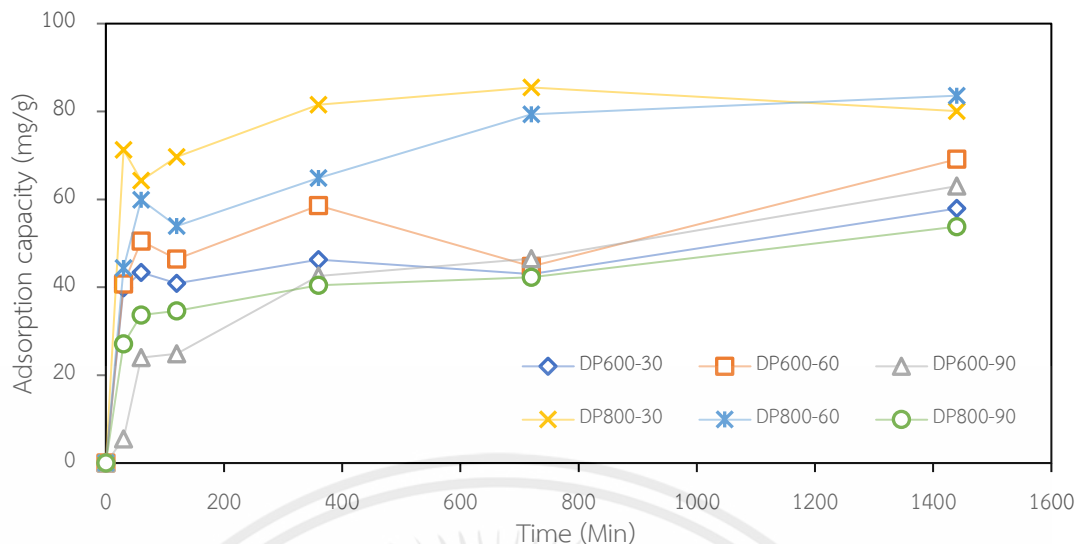
ตารางที่ 4.4 ซึ่งหากข้อมูลการทดลองสอดคล้องกับสมการ pseudo first-order จะหมายถึงอัตราการคายถูกจำกัดด้วยการทำลายพันธะที่บริเวณผิวซึ่งสารถูกดูดซับยึดกับวัสดุดูดซับที่บริเวณผิว อัตราการเกิดปฏิกิริยาการคายแปรผันตรงกับความเข้มข้น และสำหรับสมการ pseudo second-order อัตราการเกิดปฏิกิริยาการคายแปรผันตรงกับ กำลังสองของตำแหน่งในการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุดูดซับที่ไม่ถูกครอบครอง

ตารางที่ 4.4 จากจลนศาสตร์การดูดซับแบบ pseudo-first order พบว่า ถ่านชีวภาพต่าง ๆ มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ไม่เข้าใกล้ 1 และเมื่อพิจารณาจลนศาสตร์การดูดซับของถ่านชีวภาพต่าง ๆ กับแบบจำลอง pseudo-second order พบว่ามีค่า  $R^2$  เข้าใกล้ 1 มากกว่าแบบจำลอง pseudo-first order แสดงว่าจลนศาสตร์การดูดซับแคดเมียมลงบนผิวถ่านสอดคล้องกับแบบจำลอง pseudo-second order และการดูดซับแคดเมียมเกิดได้เร็วและทันทีที่สัมผัสกับผิวถ่านต่าง ๆ และเมื่อพิจารณาค่า  $k_2$  ของ DP800-30 จะมีค่าสูงกว่าถ่านชีวภาพอื่น ๆ แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาในการที่ระบบเข้าสู่สมดุลสั้นกว่าถ่านชีวภาพอื่น ๆ และสอดคล้องกับผลการทดลองที่ DP800-30 มีความสามารถในการดูดซับแคดเมียมสูงกว่าถ่านชีวภาพอื่น ๆ ที่ระยะเวลา 720 min

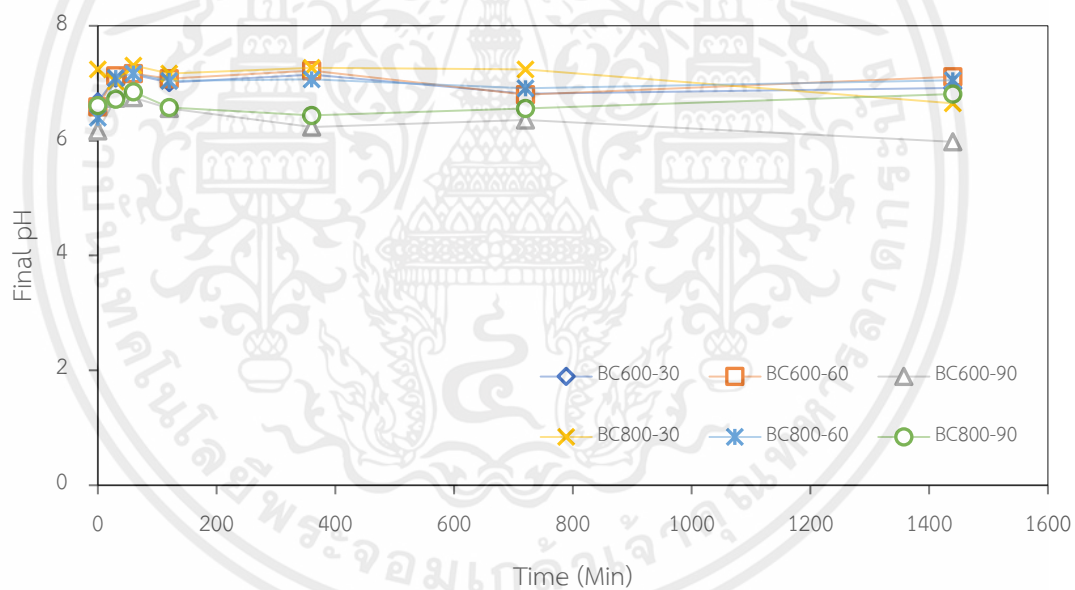


รูปที่ 4.3 ประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมของแต่ละสารตัวอย่างที่เวลาต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ความสามารถในการดูดซับแคดเมียมของแต่ละสารตัวอย่างที่เวลาต่าง ๆ



รูปที่ 4.5 ค่า pH ที่การดูดซับแคดเมียมของแต่ละสารตัวอย่างที่เวลาต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 Adsorption kinetic parameters

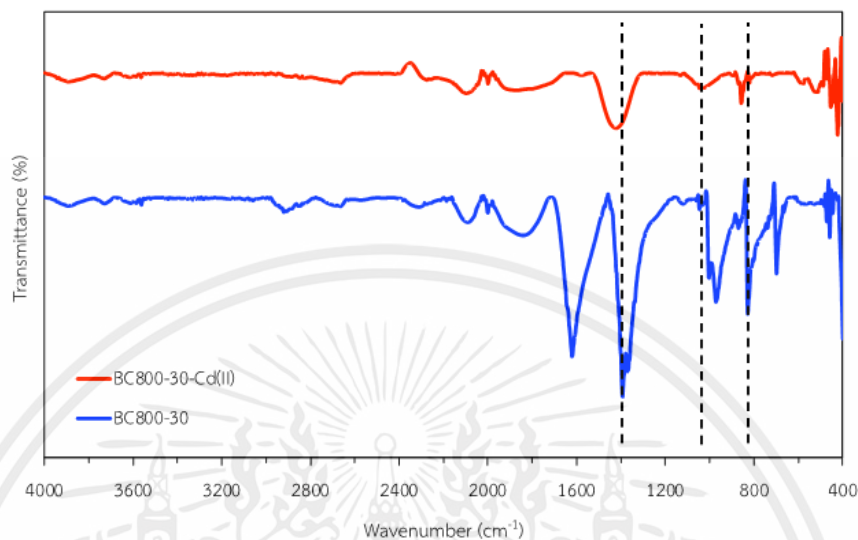
Absorbents	$q_e$ (exp) (mg/g)	Pseudo first order		Pseudo second order	
		$k_1$ (1/min)	$R^2$	$k_2$ (g/mg/min)	$R^2$
DP600-30	57.92	$6.38 \times 10^{-3}$	0.79	$2.87 \times 10^{-4}$	0.97
DP600-60	69.13	$6.54 \times 10^{-3}$	0.78	$2.09 \times 10^{-4}$	0.94
DP600-90	63.02	$4.14 \times 10^{-3}$	0.90	$5.41 \times 10^{-5}$	0.97
DP800-30	85.47	$1.61 \times 10^{-2}$	0.89	$2.43 \times 10^{-3}$	0.99
DP800-60	83.60	$6.50 \times 10^{-3}$	0.91	$2.01 \times 10^{-4}$	0.98
DP800-90	53.81	$5.21 \times 10^{-3}$	0.82	$1.94 \times 10^{-4}$	0.97

#### 4.7 ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FTIR) ของ DP800-30 ก่อนและหลังการดูดซับแคดเมียม

การศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของ DP800-30 ก่อนและหลังการดูดซับโลหะหนักแคดเมียม ผลการศึกษาแสดงในรูปที่ 4.6 โดยใช้เทคนิค FTIR ในช่วงเลขคลื่น  $400 - 4000 \text{ cm}^{-1}$  พื้นผิวของ DP800-30 ก่อนการดูดซับแคดเมียม พบว่าตำแหน่ง  $3000-3500 \text{ cm}^{-1}$  ของ O-H stretching มีตำแหน่งของแถบกว้าง และปรากฏพีคเพียงเล็กน้อยที่ตำแหน่ง  $2085 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันของ  $\text{C}\equiv\text{C}$  stretching (alkynes) และปรากฏ พีคขึ้นที่ตำแหน่ง  $1394 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันของ O-H bending ของกลุ่มกรดคาร์บอกซิลิก (carboxylic acid) และ  $1024 \text{ cm}^{-1}$  อาจจะเป็นหมู่ฟังก์ชันของ C-O stretching หรือ aromatic structures นอกจากนี้ยังพบหมู่ฟังก์ชันของ C-H bending (aromatic complexes) ที่ตำแหน่ง  $829 \text{ cm}^{-1}$  และเมื่อพิจารณาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของ BC800-30 หลังการดูดซับโลหะหนักแคดเมียม พบว่าสเปกตรัมที่ตำแหน่งประมาณ  $1394 \text{ cm}^{-1}$  และที่ตำแหน่ง  $1024 \text{ cm}^{-1}$  นี้เกิดการลดลงหรือเลื่อนหลังจากการดูดซับแคดเมียม เนื่องจากเกิดกลไกการดูดซับทางเคมีบน DP800-30 ที่ทำหน้าที่ในการดูดซับแคดเมียม โดยโลหะหนักแคดเมียมจะถูกดูดซับด้วยพื้นผิวที่อุดมด้วยกรดคาร์บอกซิลิกผ่านสารเชิงซ้อนของคาร์บอกซิเลต (Carboxylate complex) [31] โดยหมู่ฟังก์ชันที่ประกอบด้วยออกซิเจนเหล่านี้บนพื้นผิวของตัวดูดซับมักจะสูญเสียโปรตอนและแตกตัวกลายเป็นไอออน จึงเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนกับไอออนของแคดเมียม นอกจากนี้ ที่ตำแหน่งประมาณ  $829 \text{ cm}^{-1}$  เป็นหมู่ฟังก์ชันของ C-H bending ซึ่งที่ตำแหน่งนี้หลังจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

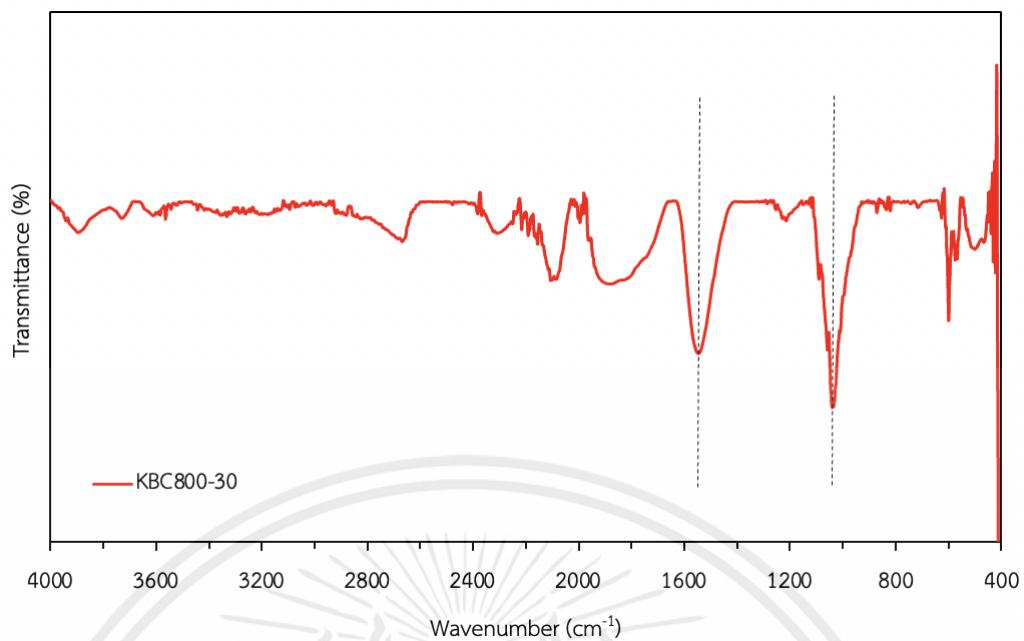
การดูดซับแคตเมียมลดลงหรือเลื่อน โดยเป็นการบ่งชี้ว่า C-H บน DP800-30 เป็นจุดดึงดูดไฟฟ้าสถิต (Electrostatic attraction site) สำหรับการดูดซับแคตเมียม [32] และ แสดงว่าถ่านชีวภาพที่ผลิตได้ มีหมู่ ฟังก์ชันที่สามารถดูดซับโมเลกุลมีขั้ว และไอออนได้



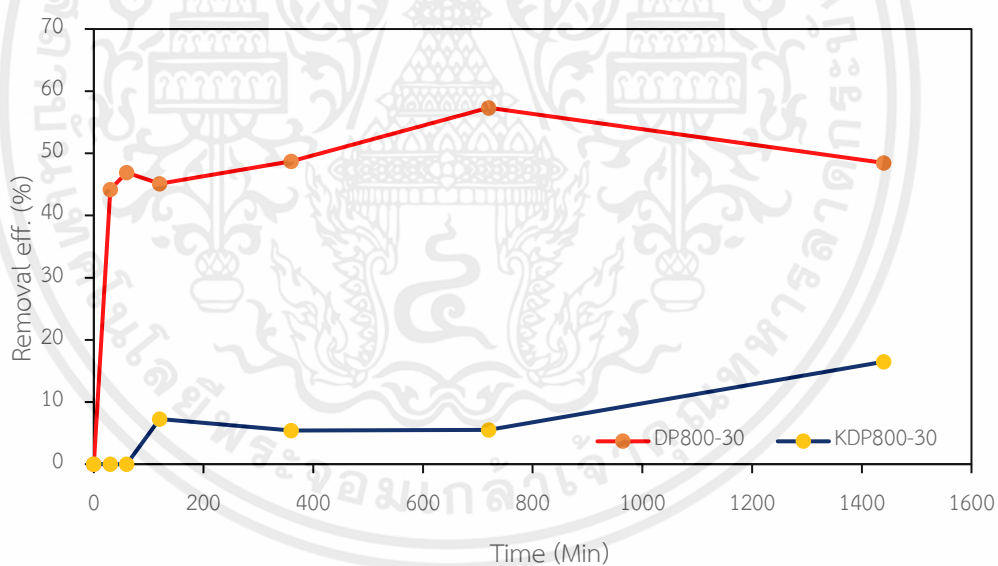
รูปที่ 4.6 สเปกตรัม FTIR ของ DP800-30 ก่อนและหลังการดูดซับแคตเมียม

#### 4.8 การกระตุ้นถ่านชีวภาพทางเคมีด้วย KOH

การศึกษาถ่านชีวภาพที่กระตุ้นด้วย KOH (KDP800-30) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับแคตเมียมของถ่านชีวภาพ โดยการศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของ DP800-30 และ KDP800-30 แสดงดังรูปที่ 4.7 พบว่าบนพื้นผิวของ KDP800-30 มีกลุ่มหมู่ฟังก์ชัน C=O (ที่ตำแหน่งประมาณ  $1541\text{ cm}^{-1}$ ) และ C-O (ที่ตำแหน่งประมาณ  $1040\text{ cm}^{-1}$ ) ซึ่งเป็นผลมาจากกระตุ้นด้วย KOH บน KDP800-30 [33] และจากการวิเคราะห์ BET พบว่า การกระตุ้นถ่านชีวภาพมีรูพรุนเพิ่มขึ้น เนื่องจากการกระตุ้นด้วย KOH สามารถเพิ่มปริมาณของกลุ่มหมู่ฟังก์ชันที่ประกอบด้วยออกซิเจน จึงทำให้เกิดการเพิ่มพื้นที่ผิวและปริมาตรของรูพรุนของถ่านชีวภาพ [34] แต่เมื่อศึกษาการดูดซับแคตเมียมด้วยถ่านชีวภาพที่กระตุ้นด้วย KOH จะเห็นว่ามีความไวของประสิทธิภาพที่ลดลง ดังรูปที่ 4.8 อาจเป็นผลเนื่องมาจากในระหว่างกระบวนการกระตุ้นทางเคมีด้วย KOH จะเกิดสลายตัวเป็นโพแทสเซียม (Inorganic K) ซึ่งทำปฏิกิริยากับคาร์บอน และส่งผลให้ทำลายโครงสร้างผนังเซลล์ของถ่านชีวภาพที่ผ่านการกระตุ้น [35] ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4.9 ที่แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ KDP800-30

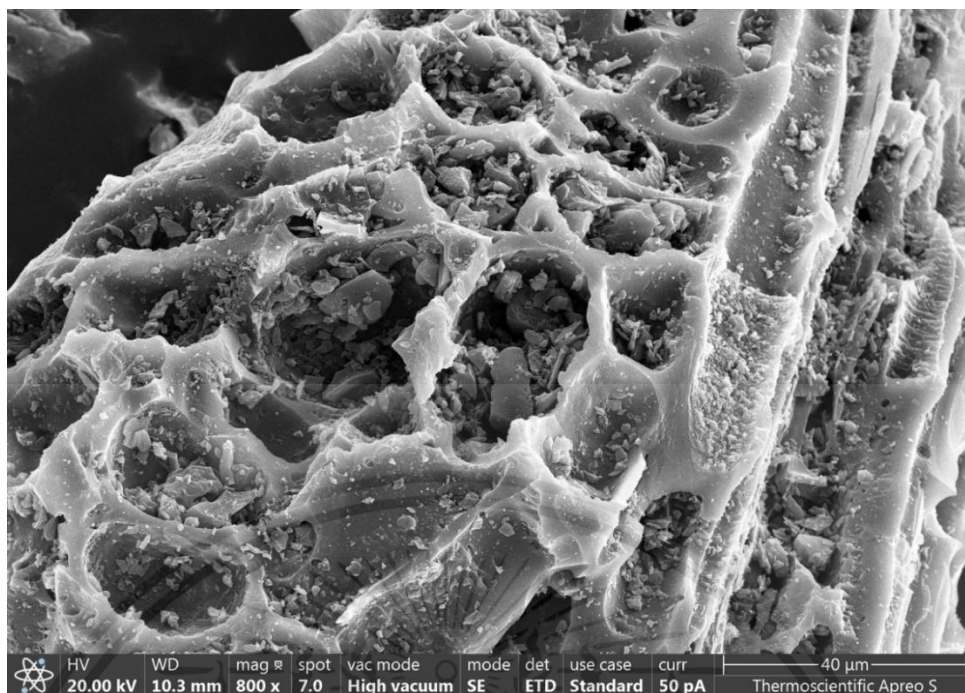


รูปที่ 4.7 หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของ DP800-30 และ KDP800-30



รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพในการดูดซับแคตเมียมของถ่านชีวภาพก่อนและหลังการกระตุ้นด้วย KOH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



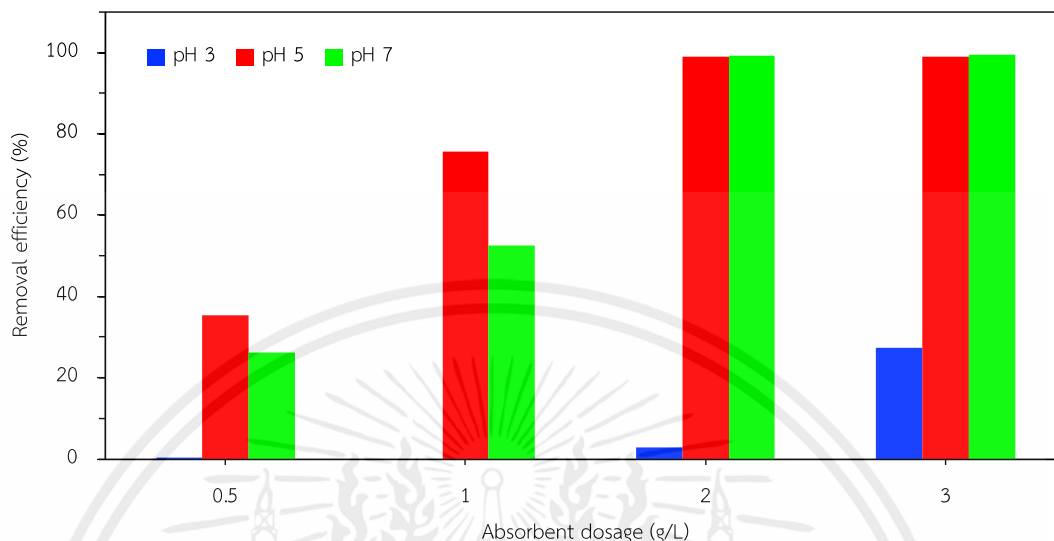
รูปที่ 4.9 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ KDP800-30

#### 4.9 ผลการศึกษาอิทธิพลของค่า pH และปริมาณถ่านชีวภาพที่ใช้ในการดูดซับแคดเมียม

เพื่อศึกษาอิทธิพลของค่า pH ที่มีผลต่อความสามารถของถ่านชีวภาพในการดูดซับแคดเมียม จึงทำการทดลองค่า pH ที่ 3 5 และ 7 และใช้ถ่านชีวภาพปริมาณ 0 - 3 mg/L แสดงดังรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่า ค่า pH ที่ช่วงความเป็นกรดต่างเท่ากับ 3 ความสามารถในการดูดซับมีน้อยมาก เนื่องจากสภาวะดังกล่าวอาจเกิดการแข่งขันระหว่างไอออนของโลหะแคดเมียม และไฮโดรเจนไอออนที่พบในสารละลายที่มีความเป็นกรดสูงเพื่อเข้าจับบริเวณที่มีประจุลบของตัวดูดซับ ซึ่งเมื่อเทียบกับสารละลายที่มีค่า pH ที่เข้าใกล้ความเป็นกลาง (pH 7) จะมีประสิทธิภาพในการดูดซับที่ดีกว่าและมีแนวโน้มที่ดีขึ้น เนื่องจากเกิดจากการแข่งขันหรือการรบกวนการครอบครองประจุลบบนพื้นผิวของตัวดูดซับ ทั้ง 2 แบบระหว่างประจุบวกของแคดเมียมในสารละลาย ทั้งนี้เมื่อค่า pH เข้าใกล้ 8 พบว่าค่ามีแนวโน้มว่าจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง จึงเลือกใช้สภาวะการดูดซับที่เป็นกลางในการทำการศึกษาผลของอุณหภูมิและไอโซเทอมในลำดับถัดไป นอกจากนี้ปริมาณของถ่านชีวภาพที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดประสิทธิภาพในการดูดซับที่ดียิ่งขึ้นตามไปด้วยซึ่งจากการทดลองจะเห็นได้ว่าปริมาณถ่านชีวภาพที่ 2 g/L และ 3 g/L มีประสิทธิภาพการดูดซับที่ใกล้เคียงกัน (> 1%) แต่เมื่อดูความสามารถในการดูดซับที่ 2 g/L แล้วพบว่า มีความสามารถในการดูดซับที่ดีกว่า และเพื่อเป็นการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประหยัดและลดต้นทุนของถ่านชีวภาพ ดังนั้นจึงเลือกปริมาณของถ่านชีวภาพที่ 2 g/L ในการวิเคราะห์ในครั้งนี้

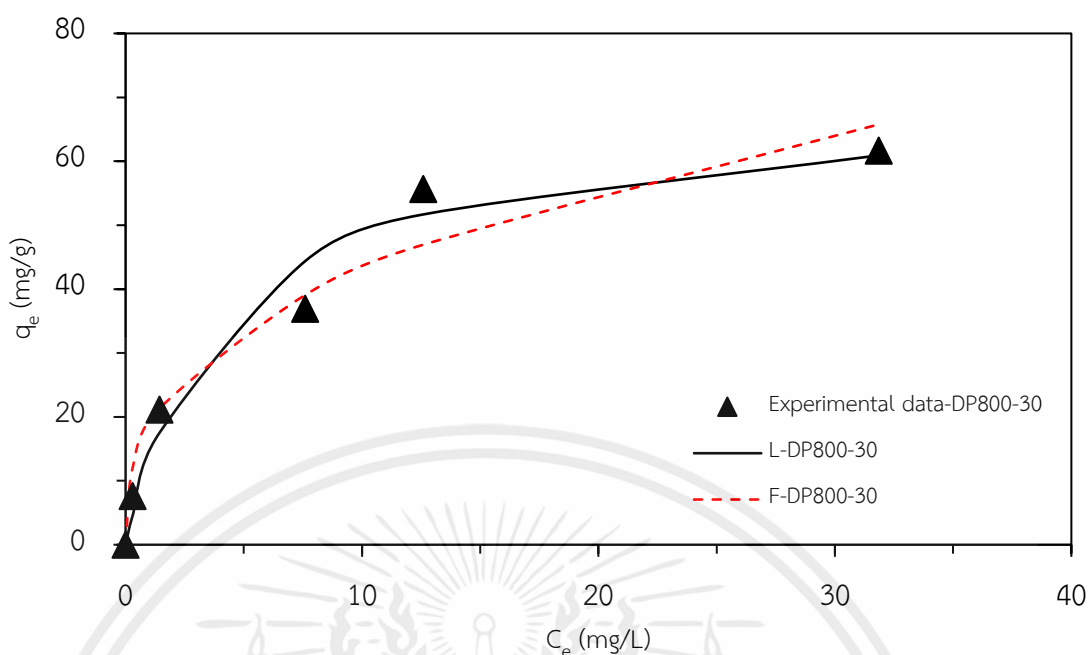


รูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียมของถ่านชีวภาพที่ค่า pH ต่าง ๆ

#### 4.10 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

จากการศึกษาข้างต้น จึงได้ดำเนินการปรับค่า pH ของแคดเมียมให้เท่ากับ 7 โดยใช้ตัวดูดซับ ปริมาณ 2 g/L และระยะเวลา 720 min ที่อุณหภูมิ 30 °C ซึ่งกำหนดให้แคดเมียมมีความเข้มข้น 10 25 50 75 และ 100 mg/L ทำการดูดซับโลหะหนักบนผิวของถ่านชีวภาพเพื่อศึกษาว่าเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Homogeneous) หรือหลายชั้น (Heterogeneous) โดยใช้สมการแลงเมียร์ ไอโซเทอมและสมการฟรุนดิชไอโซเทอมในการอธิบายการดูดซับ จากการศึกษพบว่า ถ่านชีวภาพ เข้าสู่ภาวะสมดุลที่การดูดซับแคดเมียมความเข้มข้น 10 mg/L แสดงว่า DP800-30 ปริมาณ 2 g/L สามารถดูดซับแคดเมียมได้มีประสิทธิภาพสูงสุด จากรูปที่ 4.11 และตาราง 4.7 แสดงให้เห็นว่า DP800-30 ที่อุณหภูมิ 30 °C พบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เข้าใกล้สมการเส้นตรงที่สุด ซึ่งในการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับแคดเมียม พบว่า ค่าสอดคล้องกับสมการไอโซเทอมของแลงเมียร์ มากกว่าไอโซเทอมของฟรอยลิช เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.95 ซึ่งเข้าใกล้สมการเส้นตรงมากกว่า ซึ่งกลไกการดูดซับของแลงเมียร์คือการดูดซับของตัวดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับชั้นเดียว ซึ่งตัวดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวของตัวดูดซับ โดยมีโมเลกุลของตัวดูดซับไม่เกิดการทับซ้อนกัน พื้นผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมไปด้วยตัวดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจนมีตัวดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว (ถูกดูดซับได้มากที่สุด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ไอโซเทอมการดูดซับของถ่านชีวภาพ DP800-30

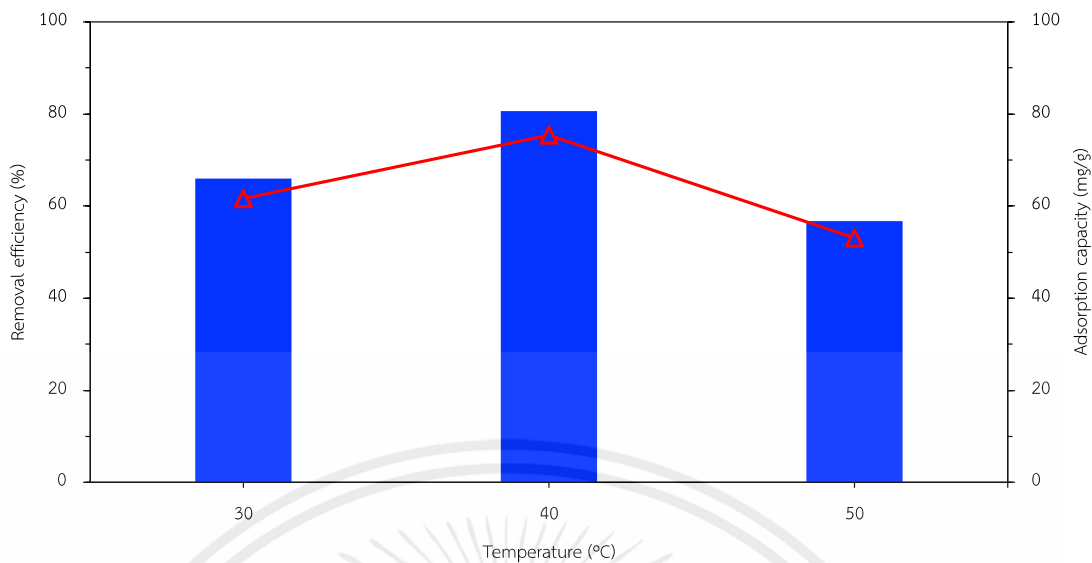
ตารางที่ 4.7 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับที่อุณหภูมิ 30 °C

Absorbents	Langmuir isotherm			Freundlich isotherm		
	Qmax. (mg/g)	$K_L$	$R^2$	n	$K_f$	$R^2$
DP800-30	68.97	0.24	0.95	2.75	18.71	0.94

#### 4.11 ผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการดูดซับแคดเมียม

การทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านชีวภาพที่อุณหภูมิที่ 30 40 และ 50 °C เพื่อศึกษาความเข้มข้นสารละลายแคดเมียมต่อการดูดซับที่ความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียม 100 mg/L แสดงดังรูปที่ 4.12 จากผลการทดลองจะเห็นได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายกับอุณหภูมิมีผลต่อการดูดซับ และจะเห็นได้ชัดว่าที่อุณหภูมิ 30 °C มีปริมาณการดูดซับแคดเมียมที่มีแนวโน้มว่าจะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิ 50 °C จะมีค่าปริมาณการดูดซับแคดเมียมลดลงซึ่งเมื่อประสิทธิภาพการดูดซับลดลงจะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลงตามไปด้วย แต่เมื่อค่าความเข้มข้นของแคดเมียมเพิ่มขึ้น จะมีอัตราการเพิ่มขึ้นที่แนวโน้มที่จะลดลงเรื่อย ๆ เช่นกัน ดังนั้น การเลือกใช้อุณหภูมิที่เหมาะสมคือที่อุณหภูมิ 40 °C มีปริมาณการดูดซับที่คงที่และดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ประสิทธิภาพและความสามารถในการดูดซับแคดเมียมที่อุณหภูมิต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การศึกษากาการผลิตถ่านชีวภาพจากเปลือกทุเรียนหมอนทองโดยใช้อุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิสที่ 600 และ 800 °C แล้วให้ความร้อนต่อเป็นเวลา 30 60 และ 90 min และทดสอบลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านชีวภาพที่ได้ก่อนนำไปใช้เป็นวัสดุดูดซับโลหะหนัก เพื่อให้ผลการศึกษาเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยและเพื่อเป็นการพัฒนางานวิจัยในอนาคต ซึ่งสรุปผลการศึกษาวิจัยและมีข้อเสนอแนะดังนี้

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษากาการผลิตถ่านชีวภาพจากเปลือกทุเรียนหมอนทองโดยใช้อุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิสที่ 600 และ 800 °C แล้วให้ความร้อนต่อเป็นเวลา 30 60 และ 90 min และทดสอบลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านชีวภาพ พบว่า ถ่านชีวภาพจากเปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ 800 °C ที่เวลา 30 min มีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมดีที่สุดใน ซึ่งความสามารถในการดูดซับแคดเมียมขึ้นอยู่กับปริมาณของถ่านชีวภาพ ความเข้มข้นของแคดเมียมและเวลาในการสัมผัส

5.1.1 การศึกษากาการผลิตถ่านชีวภาพจากเปลือกทุเรียนหมอนทองด้วยกระบวนการไพโรไลซิส และศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านชีวภาพ

คุณสมบัติของถ่านชีวภาพเป็นส่วนสำคัญในการทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียมของถ่านชีวภาพจากเปลือกทุเรียน ซึ่งการดำเนินการศึกษาครั้งนี้จะศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมี โดยการศึกษาทางกายภาพคือการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology) ศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field emission scanning electron microscope: FESEM) และศึกษาด้วยเครื่องวิเคราะห์ความพรุน (BET) จากการศึกษาพบว่า ถ่านชีวภาพมีผิวเรียบและมีโครงสร้างที่ไม่หนา มีปริมาณรูพรุนเป็นขนาดกลาง และการศึกษาคุณสมบัติทางเคมี โดยการศึกษาการกระตุ้นด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จากการศึกษาทั้งหมดพบว่า ถ่านชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 800 °C ที่เวลา 30 min มีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมดีกว่าถ่านชีวภาพที่ถูกกระตุ้นสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ดังนั้นการกระตุ้นสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จึงไม่เหมาะกับการกระตุ้นถ่านชีวภาพที่เข้าสู่ภาวะสมดุล ส่งผลให้สามารถนำเปลือกทุเรียนมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านชีวภาพเพื่อดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียได้เลย ไม่จำเป็นต้องผ่านการกระตุ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.2 การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักแคดเมียม

ดำเนินการโดยศึกษาค่า pH ระยะเวลาในการสัมผัสระหว่างถ่านชีวภาพกับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ ปริมาณของถ่านชีวภาพและอุณหภูมิที่เหมาะสมในการดูดซับ ผลการศึกษาพบว่าค่า pH ที่เหมาะสมอยู่ที่ 7 ใช้ระยะเวลาการสัมผัส 720 นาที ถ่านชีวภาพปริมาณ 2 g/L และอุณหภูมิ 40 °C เป็นสภาวะที่เหมาะสมเพราะมีประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียมดีที่สุดเมื่อเทียบกับสภาวะอื่น ๆ และการนำเปลือกทุเรียนมาพัฒนาเป็นถ่านชีวภาพเป็นการช่วยเพิ่มมูลค่าของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรได้

## 5.2 ข้อเสนอแนะจากการศึกษาวิจัย

ในการศึกษาและการผลิตถ่านชีวภาพจากเปลือกทุเรียนหมอนทองโดยใช้อุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิสที่ 600 และ 800 °C แล้วให้ความร้อนต่อเป็นเวลา 30 60 และ 90 min ในครั้งนี้พบข้อเสนอแนะเพื่อเป็นประโยชน์ในการศึกษาต่อไปดังนี้

5.2.1 ชั้นการศึกษาการดูดซับแคดเมียม สามารถศึกษาการกำจัดโลหะหนักชนิดอื่นได้เพิ่มเติมในอนาคต เช่น คอปเปอร์ ทองแดง โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมจากการศึกษาวิจัยครั้งนี้

5.2.2 เมื่อพบว่าถ่านชีวภาพก่อนกระตุ้นทางเคมีมีประสิทธิภาพดีเยี่ยมแล้วไม่ควรกระตุ้นทางเคมีต่อเพราะจะทำให้ถ่านชีวภาพไม่อยู่ในช่วงสภาวะสมดุล

5.2.3 ขั้นตอนการศึกษาการกำจัดโลหะหนักสามารถศึกษาต่อเกี่ยวกับแนวโน้มของประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก หากปริมาณถ่านชีวภาพและความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียมีปริมาณแตกต่างกัน

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Zeraatkar, A.K. et al. (2016). “Potential use of algae for heavy metal bioremediation, a critical review.” **Journal of Environmental Management** 181, 817-831.
- [2] Fu, F. et al. (2012). “Application of a novel strategy—Advanced Fenton-chemical precipitation to the treatment of strong stability chelated heavy metal containing wastewater.” **Chemical Engineering Journal** 189–190, 283-287.
- [3] Hebbar, R.S. et al. (2016). “Fabrication of polydopamine functionalized halloysite nanotube/polyetherimide membranes for heavy metal removal.” **Journal of Materials Chemistry A** 4, 764-774.
- [4] ธนศิษฐ์ วงศ์ศิริอำนวย. (2562). การผลิตถ่านชีวภาพและแนวทางการใช้ประโยชน์. เข้าถึงเมื่อ 4 ธันวาคม 2564. เข้าถึงได้จาก <https://erp.mju.ac.th/articleDetail.aspx?qid=1072>.
- [5] จีรวรรณ โจรนพทรัพย์. (2563). **ทุเรียนชุมพร หอมหวานมันกลมกล่อม ผลิตเป็น ทุเรียนทอด...อร่อยเด็ด เคี้ยวเพลิน**. เข้าถึงเมื่อ 5 ธันวาคม 2564. เข้าถึงได้จาก [https://www.technologychaoban.com/marketing/article\\_23716](https://www.technologychaoban.com/marketing/article_23716).
- [6] วิกีพีเดีย สารานุกรมเสรี. (2564). **ทุเรียน**. เข้าถึงเมื่อ 5 ธันวาคม 2564. เข้าถึงได้จาก <https://th.wikipedia.org/wiki/ทุเรียน>.
- [7] นรินทร์ เจริญพันธ์, นรินทร์ เจริญพันธ์ และสามารถ สายอุต. (2560). “องค์ประกอบทางเคมีและแนวโน้มการใช้ประโยชน์จากผลพลอยได้ และเศษเหลือทิ้งจากการแปรรูปผลไม้เขตร้อน 4 ชนิด” . **Thai Science and Technology Journal (TSTJ)**. doi: 10.14456/tstj.2020.10.
- [8] Kaidee (2564). ทุเรียนหอมทอง. เข้าถึงเมื่อ 1 ธันวาคม 2564. เข้าถึงได้จาก <https://www.kaidee.com/product-365620250>.
- [9] กรมควบคุมมลพิษ. (2545). “ประโยชน์และความเป็นพิษของโลหะหนักแคดเมียม”. **เอกสารเผยแพร่ทางวิชาการของสารเคมีเฉพาะเรื่อง แคดเมียม(cadmium)** 3, 2: 5-9
- [10] คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.(2549). กระบวนการไฟโรไลซิสแบบเร็ว เข้าถึงเมื่อ 6 พฤศจิกายน 2564. เข้าถึงได้จาก [https://stscholar.nstda.or.th/stscholar/csts/images/PDF/seminar-energy/poster\\_adisak%20pattiya\\_msu.pdf](https://stscholar.nstda.or.th/stscholar/csts/images/PDF/seminar-energy/poster_adisak%20pattiya_msu.pdf)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] Adisek Pattiya (2560). “การผลิตไบโอออยล์จากชีวมวลด้วยกระบวนการไพโรไลซิส”. เอกสารประกอบการสอนรายวิชา Bio-energy and renewable resources research laboratory มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
- [12] คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.(2549). กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว เข้าถึงเมื่อ 6 พฤศจิกายน 2564. เข้าถึงได้จาก [https://stscholar.nstda.or.th/stscholar/csts/images/PDF/seminar-energy/poster\\_adisak%20pattiya\\_msu.pdf](https://stscholar.nstda.or.th/stscholar/csts/images/PDF/seminar-energy/poster_adisak%20pattiya_msu.pdf)
- [13] สุพะไชย์ จินดาวุฒิกุล. (2559). “การวัดพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของวัสดุดูดซับ”. วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ 189, 22-24.
- [14] Albadarin, A.B., Mangwandi, C., 2015. “Mechanisms of alizarin red s and methylene blue biosorption onto olive stone by/product.” **isotherm study in single and binary systems. J. Environ. Manag** 164, 86-93.
- [15] Rehman, R., Farooq, S., Mahmud, T., 2019. “Use of Agro-waste Musa acuminata and Solanum tuberosum peels for economical sorptive removal of Emerald green dye in ecofriendly way.” **J. Clean. Prod** 206, 819-826.
- [16] กัทรเดช ขวัญอยู่ (2560). **ไอโซเทอมของการดูดซับ (adsorption isotherm)**. เข้าถึงเมื่อ 6 ธันวาคม 2564. เข้าถึงได้จาก <https://sites.google.com/site/csicscitu/instrument/kheruxngwikheraahkhunlaks-naphunthiphiwsurfaceareaanalyzer/adsorption-isotherm>.
- [17] ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต. (2560). **ไอโซเทอมของการดูดซับ (adsorption isotherm)**. เข้าถึงเมื่อ 6 ธันวาคม 2564. เข้าถึงได้จาก <https://sites.google.com/site/csicscitu/instrument/kheruxngwikheraahkhunlaks-naphunthiphiwsurfaceareaanalyzer/adsorption-isotherm>.
- [18] กุลธิดา สะอาด. (2557). “ประสิทธิภาพการดูดซับสีของถ่านชีวภาพในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ”. วิทยานิพนธ์วิทยาศาตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์.
- [19] อรทัย วงษาเวียง และคณะ. (2560). “ไพโรไลซิสของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในท้องถิ่นจังหวัดนครปฐม”. วิทยานิพนธ์วิทยาศาตร์และเทคโนโลยีบัณฑิต สาขาวิชาเคมี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม.
- [20] ปานใจสื่อประเสริฐสิทธิ์, ศิริวรรณ แก้วสวิง และอมรประภา ทิศกระโทก. (2563). “การผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ่านชีวภาพและเชื้อเพลิงชีวภาพจากเปลือกทุเรียน”. *Journal of Science & Technology MSU*, 2563, 39.5

- [21] กัญยาพร ไชยวงศ์ และสิทธิบุรณ ศิริพรอัครชัย. (2559). “การวิเคราะห์พารามิเตอร์การผลิต ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า”. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, 28-35.
- [22] Zahoor Ahmad et al. (2018). “Removal of Cu(II), Cd(II) and Pb(II) ions from aqueous solutions by biochars derived from potassium-rich biomass.” *Journal of Cleaner Production* 180, 437-449.
- [23] Anwar Ameen Hezam Saeed et al. (2021). “Removal of cadmium from aqueous solution by optimized rice husk biochar using response surface methodology.” *Ain Shams Engineering Journal* 13, 2: 127-142.
- [24] Zhenhao Li et al. (2020) “A high-performance biochar produced from bamboo pyrolysis with in-situ nitrogen doping and activation for adsorption of phenol and methylene blue.” *Chinese Journal of Chemical Engineering* 28, 11: 2872-2880.
- [25] Farihausnah Hussin, Mohamed Kheireddine Aroua and Małgorzata Szałachta. (2021). “Biochar derived from fruit by-products using pyrolysis process for the elimination of Pb(II) ion: An updated review.” *Chemosphere* 287, 3: 132-139.
- [26] Y.L. Tan, A.Z. Abdullah and B.H. Hameed. (2018). “Catalytic fast pyrolysis of durian rind using silica-alumina catalyst: Effects of pyrolysis parameters.” *Bioresource Technology* 264, 198-205.
- [27] Sabolc Pap et al. (2018). “Synthesis of highly-efficient functionalized biochars from fruit industry waste biomass for the removal of chromium and lead.” *Journal of Molecular Liquids* 268, 315-325.
- [28] Huosheng Li et al. (2019). “Biochar derived from watermelon rinds as regenerable adsorbent for efficient removal of thallium(I) from wastewater.” *Process Safety and Environmental Protection* 127, 257-266.
- [29] Guangcai Tan et al. (2559). “Sorption of mercury (II) and atrazine by biochar, modified biochars and biochar based activated carbon in aqueous solution.” *Bioresource Technology* 211, 727-735.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [30] Amali Herath. (2021). " KOH-activated high surface area Douglas Fir biochar for adsorbing aqueous Cr(VI), Pb(II) and Cd(II)." **Chemosphere** 269.
- [31] Yang et al. (2021). "Adsorption characteristics and the removal mechanism of two novel Fe-Zn composite modified biochar for Cd(II) in water." **Bioresource Technology** 333, 125078.
- [32] Li et al. (2020). "Comparison of adsorption properties for cadmium removal from aqueous solution by Enteromorpha prolifera biochar modified with different chemical reagents." **Environmental Research** 186, 109502.
- [33] Fu et al. (2019). "Activated bio-chars derived from rice husk via one- and two-step KOH-catalyzed pyrolysis for phenol adsorption." **Science of The Total Environment** 646, 1567-1577.
- [34] Wang et al. (2020). "Green immobilization of toxic metals using alkaline enhanced rice husk biochar: Effects of pyrolysis temperature and KOH concentration." **Science of The Total Environment** 720, 137584.
- [35] Oginni et al. (2019). "Influence of one-step and two-step KOH activation on activated carbon characteristics." **Bioresource Technology Reports** 7, 100266.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 ปริมาณเถ้าของถ่านชีวภาพที่เวลาต่าง ๆ

Absorbents	Weight of cup (g)	Weight of cup + cinder after pyrolysis (g)	Weight of absorbent (g)	%Total cinder in absorbent
DP600-30	31.09	31.31	1.04	20.96
DP600-60	31.51	31.73	1.07	20.49
DP800-30	28.77	29.00	1.11	20.84
DP800-60	32.73	32.96	1.08	21.39

ตารางที่ 2 ปริมาณของแคดเมียมที่มีความเข้มข้น 0.1 g/L และค่า pH หลังการเขย่าที่เวลาต่าง ๆ

Time (Min)	Cont. of Cd(II) (mg/L)	Final pH	Avg of Cont. of Cd(II) (mg/L)	Avg of final pH	S.D. of cont. of Cd(II) (mg/L)	S.D. of final pH																															
0	101.88	3.29	101.59	3.41	0.29	0.12																															
	101.30	3.52					60	100.93	4.19	101.08	3.92	0.15	0.27	101.23	3.65	120	104.34	3.22	103.53	3.30	0.81	0.08	102.72	3.38	720	102.78	3.24	103.18	3.33	0.39	0.09	103.57	3.42	1440	101.12	4.22	101.42
60	100.93	4.19	101.08	3.92	0.15	0.27																															
	101.23	3.65					120	104.34	3.22	103.53	3.30	0.81	0.08	102.72	3.38	720	102.78	3.24	103.18	3.33	0.39	0.09	103.57	3.42	1440	101.12	4.22	101.42	4.00	0.30	0.22	101.72	3.78				
120	104.34	3.22	103.53	3.30	0.81	0.08																															
	102.72	3.38					720	102.78	3.24	103.18	3.33	0.39	0.09	103.57	3.42	1440	101.12	4.22	101.42	4.00	0.30	0.22	101.72	3.78													
720	102.78	3.24	103.18	3.33	0.39	0.09																															
	103.57	3.42					1440	101.12	4.22	101.42	4.00	0.30	0.22	101.72	3.78																						
1440	101.12	4.22	101.42	4.00	0.30	0.22																															
	101.72	3.78																																			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3 ปริมาณของถ่านชีวภาพที่เวลาต่าง ๆ

Time (Min)	Amount of BC (g)					
	DP600-30	DP600-60	DP600-90	DP800-30	DP800-60	DP800-90
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
60	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
120	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
360	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
720	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
1440	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02

ตารางที่ 4 ปริมาณแคดเมียมหลังจากเขย่าที่เวลาต่าง ๆ

Time (Min)	Cont. of Cd(II) (mg/L)					
	DP600-30	DP600-60	DP600-90	DP800-30	DP800-60	DP800-90
0	83.10	89.35	105.78	113.59	99.59	94.98
	82.71	88.79	100.93	103.06	102.63	101.96
30	43.21	48.57	83.87	42.29	55.18	71.14
	40.15	49.58	83.41	40.47	50.68	70.65
60	37.57	38.86	65.37	42.88	39.66	64.24
	39.52	37.86	63.58	42.69	43.82	66.79
120	42.18	38.29	60.72	43.90	45.64	61.46
	42.01	35.37	61.75	44.18	40.62	58.42
360	36.84	30.78	42.53	32.03	34.76	51.00
	37.56	33.06	40.96	30.19	35.94	56.39
720	33.61	42.38	35.87	23.85	20.26	57.32
	32.79	38.89	35.62	20.34	22.67	50.16
1440	25.18	20.23	16.89	33.49	15.98	35.02
	26.44	23.45	14.26	31.49	14.16	33.73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5 ค่าเฉลี่ยของปริมาณแคดเมียมหลังจากเขย่าที่เวลาต่าง ๆ

Time (Min)	Avg of cont. of Cd(II) (mg/L)					
	DP600-30	DP600-60	DP600-90	DP800-30	DP800-60	DP800-90
0	82.90	89.07	103.35	108.32	101.11	98.47
30	41.68	49.08	83.64	41.38	52.93	70.90
60	38.55	38.36	64.48	42.79	41.74	65.51
120	42.09	36.83	61.24	44.04	43.13	59.94
360	37.20	31.92	41.74	31.11	35.35	53.69
720	33.20	40.63	35.75	22.09	21.47	53.74
1440	25.81	21.84	15.57	32.49	15.07	34.37

ตารางที่ 6 ค่า S.D. ของปริมาณแคดเมียมหลังจากเขย่าที่เวลาต่าง ๆ

Time (Min)	S.D. of cont. of Cd(II) (mg/L)					
	DP600-30	DP600-60	DP600-90	DP800-30	DP800-60	DP800-90
0	0.19	0.28	2.42	5.26	1.52	3.49
30	1.53	0.50	0.23	0.91	2.25	0.25
60	0.97	0.50	0.90	0.10	2.08	1.28
120	0.08	1.46	0.51	0.14	2.51	1.52
360	0.36	1.14	0.78	0.92	0.59	2.70
720	0.41	1.74	0.13	1.75	1.20	3.58
1440	0.63	1.61	1.31	1.00	0.91	0.64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักของถ่านชีวภาพที่เวลาต่าง ๆ

Time (Min)	Removal eff. (%)					
	DP600-30	DP600-60	DP600-90	DP800-30	DP800-60	DP800-90
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	48.00	45.64	20.71	62.77	44.59	37.36
	51.46	44.16	17.36	60.73	50.62	30.71
60	54.78	56.51	38.20	62.25	60.17	43.44
	52.22	57.36	37.01	58.58	57.30	34.49
120	49.24	57.15	42.59	61.35	54.17	45.89
	49.21	60.16	38.82	57.13	60.42	42.70
360	55.66	65.55	59.79	71.80	65.09	55.10
	54.59	62.77	59.42	70.71	64.98	44.69
720	59.56	52.57	66.09	79.00	79.66	49.53
	60.36	56.20	64.71	80.26	77.91	50.80
1440	69.70	77.36	84.04	70.51	83.95	69.17
	68.03	73.59	85.87	69.44	86.20	66.92

ตารางที่ 8 ค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักของถ่านชีวภาพที่เวลาต่าง ๆ

Time (Min)	Avg of removal eff. (%)					
	DP600-30	DP600-60	DP600-90	DP800-30	DP800-60	DP800-90
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	49.73	44.90	19.04	61.75	47.61	34.04
60	53.50	56.94	37.61	60.42	58.74	38.97
120	49.23	58.66	40.71	59.24	57.30	44.30
360	55.13	64.16	59.61	71.26	65.04	49.90
720	59.96	54.39	65.40	79.63	78.79	50.17
1440	68.87	75.48	84.96	69.98	85.08	68.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 9 ค่า S.D. ของประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักของถ่านชีวภาพที่เวลาต่าง ๆ

Time (Min)	S.D. of removal eff. (%)					
	DP600-30	DP600-60	DP600-90	DP800-30	DP800-60	DP800-90
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	1.73	0.74	1.68	1.02	3.02	3.33
60	1.28	0.43	0.60	1.84	1.44	4.47
120	0.02	1.51	1.89	2.11	3.13	1.60
360	0.53	1.39	0.18	0.55	0.05	5.21
720	0.40	1.82	0.69	0.63	0.88	0.63
1440	0.84	1.89	0.91	0.54	1.13	1.13

ตารางที่ 10 ความสามารถในการดูดซับแคดเมียมของถ่านชีวภาพที่เวลาต่าง ๆ

Time (Min)	Adsorption capacity (mg/g)					
	DP600-30	DP600-60	DP600-90	DP800-30	DP800-60	DP800-90
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	39.89	40.78	5.49	71.30	44.41	27.09
	42.56	39.21	16.69	62.59	47.23	31.31
60	43.36	50.49	23.98	64.28	59.93	33.67
	43.19	48.50	35.57	60.37	58.81	35.17
120	40.92	46.42	24.90	69.68	53.95	34.66
	38.76	53.42	37.31	53.53	62.01	43.54
360	46.25	58.57	42.57	81.55	64.83	40.49
	45.15	55.73	57.11	72.87	66.69	45.57
720	43.04	44.74	46.51	85.47	79.33	42.27
	49.92	49.90	65.31	82.72	79.96	51.80
1440	57.92	69.13	63.02	80.09	83.60	53.81
	53.59	65.34	86.67	71.57	88.47	68.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 11 ค่าเฉลี่ยของความสามารถในการดูดซับแคดเมียมของถ่านชีวภาพที่เวลาต่าง ๆ

Time (Min)	Avg of adsorption capacity (mg/g)					
	DP600-30	DP600-60	DP600-90	DP800-30	DP800-60	DP800-90
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	41.23	40.00	11.09	66.95	45.82	29.20
60	43.28	49.50	29.78	62.33	59.37	34.42
120	39.84	49.92	31.11	61.61	57.98	39.10
360	45.70	57.15	49.84	77.21	65.76	43.03
720	46.48	47.32	55.91	84.10	79.65	47.04
1440	55.76	67.24	74.85	75.83	86.04	61.02

ตารางที่ 12 ค่า S.D. ของความสามารถในการดูดซับแคดเมียมของถ่านชีวภาพที่เวลาต่าง ๆ

Time (Min)	S.D. of adsorption capacity (mg/g)					
	DP600-30	DP600-60	DP600-90	DP800-30	DP800-60	DP800-90
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	1.34	0.79	5.60	4.36	1.41	2.11
60	0.09	1.00	5.80	1.96	0.56	0.75
120	1.08	3.50	6.21	8.08	4.03	4.44
360	0.55	1.42	7.27	4.34	0.93	2.54
720	3.44	2.58	9.40	1.38	0.31	4.77
1440	2.17	1.90	11.83	4.26	2.44	7.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 13 ค่า pH ของแคตเมียมที่เวลาต่าง ๆ

Time (Min)	Final pH					
	DP600-30	DP600-60	DP600-90	DP800-30	DP800-60	DP800-90
0	6.68	6.59	6.17	7.24	6.40	6.61
	6.69	6.70	6.32	7.20	6.46	6.62
30	7.09	7.13	6.74	7.03	7.09	6.72
	7.10	7.05	6.85	7.03	7.08	6.70
60	7.15	7.17	6.75	7.31	7.17	6.85
	7.11	7.22	6.74	7.33	7.15	6.97
120	7.01	7.08	6.56	7.17	7.04	6.58
	6.89	7.16	6.55	7.12	7.04	6.63
360	7.15	7.22	6.24	7.27	7.07	6.44
	7.08	7.11	6.31	7.20	7.06	6.54
720	6.82	6.80	6.36	7.24	6.91	6.56
	6.90	6.98	6.36	7.21	7.02	6.54
1440	6.92	7.11	5.98	6.65	7.05	6.81
	6.86	7.03	6.22	6.70	7.06	6.93

ตารางที่ 14 ค่าเฉลี่ยของค่า pH ของแคตเมียมที่เวลาต่าง ๆ

Time (Min)	Avg of final pH					
	DP600-30	DP600-60	DP600-90	DP800-30	DP800-60	DP800-90
0	6.69	6.65	6.25	7.22	6.43	6.62
30	7.10	7.09	6.80	7.03	7.09	6.71
60	7.13	7.20	6.75	7.32	7.16	6.91
120	6.95	7.12	6.56	7.15	7.04	6.61
360	7.12	7.17	6.28	7.24	7.07	6.49
720	6.86	6.89	6.36	7.23	6.97	6.55
1440	6.89	7.07	6.10	6.68	7.06	6.87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 15 ค่า S.D. ของค่า pH ของแคดเมียมที่เวลาต่าง ๆ

Time (Min)	S.D. of final pH					
	DP600-30	DP600-60	DP600-90	DP800-30	DP800-60	DP800-90
0	0.01	0.06	0.08	0.02	0.03	0.00
30	0.00	0.04	0.05	0.00	0.00	0.01
60	0.02	0.02	0.00	0.01	0.01	0.06
120	0.06	0.04	0.00	0.02	0.00	0.02
360	0.04	0.05	0.03	0.03	0.01	0.05
720	0.04	0.09	0.00	0.02	0.05	0.01
1440	0.03	0.04	0.12	0.02	0.00	0.06

ตารางที่ 16 ปริมาณของถ่านชีวภาพ DP800-30 และ KDP800-30

Time (Min)	Amount of BC (g)	
	DP800-30	KDP800-30
0	0.000	0.000
30	0.020	0.020
60	0.022	0.020
120	0.020	0.020
360	0.020	0.020
720	0.021	0.020
1440	0.020	0.020

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 17 ปริมาณแคดเมียมหลังจากเขย่าที่เวลาต่าง ๆ

Time (Min)	Cont. of Cd(II) (mg/L)		Avg of cont. of Cd(II) (mg/L)		S.D. of cont. of Cd(II)	
	DP800-30	KDP800-30	DP800-30	KDP800-30	DP800-30	KDP800-30
	0	113.58 113.55	113.09 113.05	113.57	113.07	0.02
30	42.29 42.27	102.45 102.47	42.28	102.46	0.01	0.01
60	42.88 42.91	100.50 100.48	42.90	100.49	0.01	0.01
120	43.90 43.87	102.16 102.11	43.89	102.14	0.02	0.02
360	32.03 32.06	101.03 101.01	32.05	101.02	0.02	0.01
720	23.85 23.84	89.06 89.08	23.85	89.07	0.01	0.01
1440	33.49 33.53	97.52 97.49	33.51	97.51	0.02	0.02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 18 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักของถ่านชีวภาพ DP800-30 และ KDP800-30 ที่เวลาต่าง ๆ

Time (Min)	Removal eff. (%)		Avg of removal eff. (%)		S.D. of removal eff. (%)	
	DP800-30	KDP800-30	DP800-30	KDP800-30	DP800-30	KDP800-30
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00				
30	62.77	9.41	62.76	9.43	0.01	0.01
	62.75	9.44				
60	62.25	11.13	62.27	11.12	0.02	0.01
	62.29	11.11				
120	61.35	9.66	61.34	9.67	0.01	0.01
	61.33	9.68				
360	71.80	10.66	71.81	10.68	0.01	0.01
	71.81	10.69				
720	79.01	21.25	79.02	21.24	0.01	0.02
	79.03	21.22				
1440	70.51	13.77	70.51	13.76	0.01	0.01
	70.50	13.74				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 19 ความสามารถในการดูดซับแคดเมียมของถ่านชีวภาพ DP800-30 และ KDP800-30 ที่เวลาต่าง ๆ

Time (Min)	Adsorption capacity (mg/g)		Avg of adsorption capacity (mg/g)		S.D. of adsorption capacity (mg/g)	
	DP800-30	KDP800-30	DP800-30	KDP800-30	DP800-30	KDP800-30
	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	71.30	10.64	71.32	10.65	0.02	0.01
60	64.28	12.59	64.30	12.58	0.02	0.01
120	69.68	10.93	69.67	10.94	0.01	0.01
360	81.55	12.05	81.54	12.04	0.02	0.02
720	85.47	24.03	85.48	24.04	0.01	0.00
1440	80.09	15.57	80.11	15.56	0.02	0.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 20 ค่า pH ของแคดเมียมที่เวลาต่าง ๆ

Time (Min)	Initial pH		Avg of initial pH		S.D. of initial pH	
	DP800-30	KDP800-30	DP800-30	KDP800-30	DP800-30	KDP800-30
0	7.24	7.24	7.24	7.23	0.00	0.01
	7.23	7.22				
30	7.03	7.05	7.04	7.06	0.01	0.01
	7.05	7.07				
60	7.31	7.14	7.30	7.15	0.01	0.01
	7.29	7.16				
120	7.17	7.10	7.18	7.09	0.00	0.01
	7.18	7.08				
360	7.27	7.22	7.26	7.23	0.01	0.01
	7.25	7.23				
720	7.24	7.12	7.25	7.13	0.01	0.01
	7.26	7.14				
1440	6.65	6.77	6.67	6.78	0.01	0.01
	6.68	6.78				

ตารางที่ 21 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับแคดเมียมด้วยถ่านชีวภาพที่ค่า pH 3

Initial pH	BC dosage (g/L)	Cont. of Cd(II) (mg/L)	Removal eff. (%)	Adsorption capacity (mg/g)
0	0	96.07	0.00	0.00
		96.03	0.00	0.00
0.5	0.5	95.76	0.32	0.61
		95.53	0.28	0.56
3	1	96.74	-0.70	-0.58
		96.29	-0.65	-0.55
2	2	93.42	2.75	1.32
		92.98	2.67	1.46
3	3	69.75	27.39	8.63
		69.41	27.22	8.57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 22 ผลการศึกษาการดูดซับแคดเมียมด้วยถ่านชีวภาพที่ค่า pH 5

Initial pH	BC dosage (g/L)	Cont. of Cd(II) (mg/L)	Removal eff. (%)	Adsorption capacity (mg/g)
5	0	97.13	0.00	0.00
		97.22	0.00	0.00
	0.5	62.10	35.35	63.67
		63.02	35.29	63.65
	1	23.49	75.55	64.03
		23.44	76.02	64.12
	2	0.89	99.07	48.12
		0.90	99.09	48.56
	3	0.86	99.10	32.09
		0.88	99.06	31.97

ตารางที่ 23 ผลการศึกษาการดูดซับแคดเมียมด้วยถ่านชีวภาพที่ค่า pH 7

Initial pH	BC dosage (g/L)	Cont. of Cd(II) (mg/L)	Removal eff. (%)	Adsorption capacity (mg/g)
7	0	97.94	0.00	0.00
		96.84	0.00	0.00
	0.5	70.97	26.13	49.05
		70.92	26.22	49.08
	1	45.56	52.58	52.39
		45.61	53.02	52.33
	2	0.81	99.16	47.38
		0.88	99.48	47.41
	3	0.44	99.54	32.50
		0.46	99.55	31.98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 24 ค่าเฉลี่ยของผลการศึกษาศึกษาการดูดซับแคดเมียมด้วยถ่านชีวภาพที่ค่า pH ต่าง ๆ

Initial pH	BC dosage (g/L)	Cont. of Cd(II) (mg/L)	Removal eff. (%)	Adsorption capacity (mg/g)
3	0	96.05	0.00	0.00
	0.5	95.65	0.30	0.59
	1	96.52	-0.68	-0.57
	2	93.20	2.71	1.39
	3	69.58	27.31	8.60
5	0	97.18	0.00	0.00
	0.5	62.56	35.32	63.66
	1	23.47	75.79	64.08
	2	0.90	99.08	48.34
	3	0.45	99.55	32.24
7	0	97.39	0.00	0.00
	0.5	70.95	26.18	49.07
	1	45.59	52.80	52.36
	2	0.85	99.32	47.40
	3	0.45	99.55	32.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 25 ค่า S.D. ของผลการศึกษาการดูดซับแคดเมียมด้วยถ่านชีวภาพที่ค่า pH ต่าง ๆ

Initial pH	BC dosage (g/L)	Cont. of Cd(II) (mg/L)	Removal eff. (%)	Adsorption capacity (mg/g)
3	0	0.02	0.00	0.00
	0.5	0.12	0.02	0.03
	1	0.22	0.03	0.02
	2	0.22	0.04	0.07
	3	0.17	0.09	0.03
5	0	0.05	0.00	0.00
	0.5	0.46	0.03	0.01
	1	0.02	0.23	0.05
	2	0.01	0.01	0.22
	3	0.01	0.02	0.06
7	0	0.55	0.00	0.00
	0.5	0.02	0.04	0.02
	1	0.02	0.22	0.03
	2	0.04	0.16	0.01
	3	0.01	0.00	0.26

ตารางที่ 26 ปริมาณของแคดเมียมที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

Cont. of Cd(II) (mg/L)	Cont. of Cd(II) (mg/L)	Avg of cont. of Cd(II) (mg/L)	S.D. of cont. of Cd(II) (mg/L)
10	8.30	8.31	0.02
	8.33		
25	22.57	22.59	0.02
	22.61		
50	44.52	44.51	0.02
	44.49		
75	68.26	68.24	0.02
	68.22		
100	93.53	93.54	0.01
	93.55		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 27 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับแคดเมียมที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ด้วยถ่านชีวภาพที่อุณหภูมิ 30 °C

Temp (°C)	Cont. of Cd(II) (mg/L)	Mass (g)	Final pH	Cont. of Cd(II) (mg/L)	Removal eff. (%)	Adsorption capacity (mg/g)
10		0.02	8.26	0.30	96.40	7.62
		0.02	8.22	0.31	96.44	7.66
25		0.02	7.90	1.43	93.66	21.14
		0.02	7.89	1.40	93.61	21.49
30	50	0.02	7.48	7.59	82.94	36.93
		0.02	7.45	7.64	83.12	36.88
	75	0.02	7.28	12.58	81.57	55.68
		0.02	7.29	12.61	81.77	55.76
100		0.02	7.09	31.86	65.94	61.67
		0.02	7.11	31.75	65.85	61.66

ตารางที่ 28 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับแคดเมียมที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ด้วยถ่านชีวภาพที่อุณหภูมิ 40 °C

Temp (°C)	Cont. of Cd(II) (mg/L)	Mass (g)	Final pH	Cont. of Cd(II) (mg/L)	Removal eff. (%)	Adsorption capacity (mg/g)
10		0.02	9.22	0.16	98.10	8.14
		0.02	9.26	0.15	98.15	8.11
25		0.02	8.55	0.10	99.56	22.47
		0.02	8.52	0.11	99.51	22.59
40	50	0.02	8.19	0.13	99.72	42.28
		0.02	8.23	0.12	99.78	42.36
	75	0.02	7.74	0.92	98.66	67.34
		0.02	7.88	0.11	98.69	67.29
100		0.02	7.19	18.14	80.61	75.39
		0.02	7.21	18.06	80.77	75.40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 29 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับแคดเมียมที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ด้วยถ่านชีวภาพที่อุณหภูมิ 50 °C

Temp (°C)	Cont. of Cd(II) (mg/L)	Mass (g)	Final pH	Cont. of Cd(II) (mg/L)	Removal eff. (%)	Adsorption capacity (mg/g)
10		0.02	8.89	0.20	97.64	8.10
		0.02	8.84	0.26	97.66	8.11
25		0.02	8.59	0.11	99.50	20.41
		0.02	8.55	0.10	99.47	20.46
50	50	0.02	7.62	1.14	97.44	43.38
		0.02	7.65	1.11	97.61	43.33
	75	0.02	7.34	4.18	93.88	64.08
		0.02	7.33	4.21	94.13	64.19
100		0.02	6.91	40.39	56.81	53.13
		0.02	6.97	40.36	56.82	53.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 30 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับแคดเมียมที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ด้วยถ่านชีวภาพที่อุณหภูมิ 30 40 และ 50 °C

Temp (°C)	Cont. of Cd(II) (mg/L)	Mass (g)	Final pH	Cont. of Cd(II) (mg/L)	Removal eff. (%)	Adsorption capacity (mg/g)
30	10	0.02	8.24	0.31	96.42	7.64
	25	0.02	7.90	1.42	93.64	21.32
	50	0.02	7.47	7.62	83.03	36.91
	75	0.02	7.29	12.60	81.67	55.72
	100	0.02	7.10	31.81	65.90	61.67
40	10	0.02	9.24	0.16	98.13	8.13
	25	0.02	8.54	0.11	99.54	22.53
	50	0.02	8.21	0.13	99.75	42.32
	75	0.02	7.81	0.52	98.68	67.32
	100	0.02	7.20	18.10	80.69	75.40
50	10	0.02	8.87	0.23	97.65	8.11
	25	0.02	8.57	0.11	99.49	20.44
	50	0.02	7.64	1.13	97.53	43.36
	75	0.02	7.34	4.20	94.01	64.14
	100	0.02	6.94	40.38	56.82	53.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล นางสาวศญาดา ว่องย่อง  
 วัน เดือน ปีเกิด วันที่ 31 มีนาคม พ.ศ. 2543  
 ภูมิลำเนา จังหวัดสุราษฎร์ธานี  
 ที่อยู่ 1/4 หมู่ 2 ตำบลคลองน้อย อำเภอชัยบุรี  
 จังหวัดสุราษฎร์ธานี 84350  
 E-mail wongyong43@gmail.com

### ประวัติการศึกษา

- สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย (วิทย์-คณิต) ปีการศึกษา 2560 จากโรงเรียนชัยบุรีพิทยา
- สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมพลังงาน) ปีการศึกษา 2564 จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

