การเปรียบเทียบอุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิสที่ส่งผลต่อสมบัติของไบโอชาร์สำหรับดูดซับเมทิลีนบลู

COMPARISON OF PYROLYSIS TEMPERATURE EFFECT ON BIOCHAR PROPERTIES FOR METHYLENE BLUE ADSORPTION

ธราเทพ คำไทย

THARATHEP KHAMTHAI

พรชนก คำจันทร์

PORNCHANOK KHAMCHAN

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

หลักสูตรวิศวกรรมพลังงาน

ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COMPARISON OF PYROLYSIS TEMPERATURE EFFECT ON BIOCHAR PROPERTIES FOR METHYLENE BLUE ADSORPTION

THARATHEP KHAMTHAI
PORNCHANOK KHAMCHAN

A PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FUFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE DEGREE OF BACHELOR FO ENGINEERING IN ENERGY ENGINEERING
DEPARTMENT OF ENGINEERING
KING MONGKUY'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADGRABANG
PRINCE OF CHUMPHON CAMPUS
2022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2023

DEPARTMENT OF ENGINEERING

KING MONGKUY'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADGRABANG

PRINCE OF CHUMPHON CAMPUS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

ใบรับรองปริญญานิพนธ์

หัวข้อปริญญานิพนธ์ การเปรียบเทียบอุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิสที่ส่งผลต่อสมบัติของไบโอชาร์สำหรับดูดซับเมทิลีนบลู

Project Title COMPARISON OF PYROLYSIS TEMPERATURE EFFECT ON BIOCHAR PROPERTIES FOR METHYLENE BLUE ADSORPTION

ชื่อนักศึกษา นาย ธราเทพ คำไทย **รหัสประจำตัว** 62201130

นางสาว พรชนก คำจันทร์ **รหัสประจำตัว** 62201140

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมพลังงาน

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. ดร. วารุณี ลิ่มมั่น

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รศ. ดร. ธัชพล จุ้งเจริญ

ปริญญานิพนธ์

คณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์			ลายมือชื่อ
รศ.ดร.ชัยวัฒน์	รัตนมีชัยสกุล	กรรมการสอบ	
ผศ.ดร.ศิริวรรณ	ศรีสังข์	กรรมการสอบ	
ผศ.ดร.ณัฐพงศ์	รัตนเดช	กรรมการสอบ	
ผศ.ว่าที่ร้อยตรี ดร.กิตติศักดิ์	เพ็ชรพันธ์	กรรมการสอบ	
รศ.ดร.นฤบดี	ศรีสังข์	กรรมการสอบ	
รศ.ดร.ธัชพล	จุ้งเจริญ	อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	
ผศ.ดร.วารุณี	ลิ่มมั่น	อาจารย์ที่ปรึกษา	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 7 มิถุนายน 2566 เวลา 13.00-14.30 น.

สถานที่สอบ ณ ห้องสอบที่ 2 อาคาร A ห้อง A304

ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ รัตนเดช)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 12 มิถุนายน พ.ศ.2566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การเปรียบเทียบอุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิสที่ส่งผลต่อสมบัติของไบโอชาร์สำหรับดูดซับเมทิลีนบลู	
ชื่อนักศึกษา	นาย ธราเทพ คำไทย	**รหัสประจำตัว** 62201130
	นางสาว พรชนก คำจันทร์	**รหัสประจำตัว** 62201140
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	
สาขาวิชา	วิศวกรรมพลังงาน	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ. ดร. วารุณี ลิ่มมั่น	
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รศ. ดร. ธัชพล จุ้งเจริญ	
ปริญญานิพนธ์		

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิสที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของไบโอชาร์จากเปลือกผลไม้เหลือทิ้ง ซึ่งประกอบด้วยเปลือกมะนาว เปลือกส้มจี๊ด เปลือกสละ และการผสมร่วมกันของเปลือกผลไม้ พร้อมทั้งศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับเมทิลีนบลูด้วยไบโอชาร์จากเปลือกผลไม้เหลือทิ้ง ผลจากการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิไพโรไลซิสที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของไบโอชาร์ พบว่า ค่าร้อยละผลผลิตของไบโอชาร์ที่น้อยที่สุดเท่ากับ 26.98 ของไบโอชาร์จากเปลือกมะนาว - สละ ที่อุณหภูมิ 700 °C ค่ามากที่สุดเท่ากับ 36.53 ของไบโอชาร์จากเปลือกสละ ที่อุณหภูมิ 500 °C และการวิเคราะห์ปริมาณธาตุและองค์ประกอบของไบโอชาร์พบว่าปริมาณคาร์บอนที่น้อยที่สุดอยู่ที่ 69.62 ± 1.19 ของไบโอชาร์จากเปลือกมะนาว ที่อุณหภูมิ 500 °C ค่ามากที่สุดอยู่ที่ 73.68 ± 0.16 ของไบโอชาร์จากเปลือกสละ ที่อุณหภูมิ 500 °C ด้วยเหตุนี้สามารถกล่าวได้ว่าในบรรดาเปลือกผลไม้เหลือทิ้งทั้ง 3 ประเภท ไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกสละนั้นให้ปริมาณคาร์บอนที่สูงทั้งที่อุณหภูมิ 500 °C และ 700 °C ทำให้ค่าร้อยละผลผลิตของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกสละนั้นมีค่าสูงตามไปด้วย พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกสละที่อุณหภูมิ 500 °C นั้นมีค่า 70.874 m^2/g และ 0.027 cm^3/g เมื่อทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับเมทิลีนบลู พบว่า ไบโอชาร์จากการผสมร่วมกันของเปลือกผลไม้ทั้ง 3 ชนิด ที่อุณหภูมิ 700 °C มีประสิทธิภาพในการดูดซับเมทิลีนบลูมีค่ามากที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 73.18 ± 0.01% และมีความสามารถในการดูดซับอยู่ที่ 7.32 ± 0.01 mg/g

คำสำคัญ : เปลือกมะนาว เปลือกส้มจี๊ด เปลือกสละ ไพโรไลซิส ไบโอชาร์ เมทิลีนบลู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	**COMPARISON OF PYROLYSIS TEMPERATURE EFFECT ON BIOCHAR PROPERTIES FOR METHYLENE BLUE ADSORPTION**	
Student	Mr. Tharathep Khamthai	**Student ID** 62201130
	Miss. Pornchanok Khamcham	**Student ID** 62201140
Degree	Bachelor of Engineering	
Program	Energy Engineering	
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Warunee Limmun	
Thesis Co -Advisor	Assoc. Prof. Dr. Thatchapol Chungcharoen	

ABSTRACT

This research aimed to compare the effects of temperature during the pyrolysis process on biochar properties derived from several waste fruit peels, including lemon peel, kumquat peel, salak peel, and their combination. The study investigated biochar yield percentage, carbon content, and trace element analysis at different temperatures. The results reveal that the lowest yield of 26.98% was obtained from the biochar of a combination of lemon and salak peels at 700 °C, while the highest yield of 36.53% was achieved from salak peel biochar at 500 °C. The carbon content of lemon peel biochar at 500 °C had the lowest value of 69.62 ± 1.19%, whereas salak peel biochar at 500 °C exhibited the highest carbon content of 73.68 ± 0.16%. Notably, salak peel waste resulted in biochar with the highest carbon content among the tested fruit peels. Moreover, both at 500 °C and 700 °C, salak peel derived biochar displayed high percentage yields. The specific surface area and pore volume of salak peel biochar at 500 °C were measured as 70.874 m2/g and 0.027 cm3/g, respectively. Investigation of methylene blue adsorption efficiency showed that the combination of the three fruit peels at 700 °C exhibited the highest efficiency, with an adsorption efficiency of 73.18 ± 0.01% and an adsorption capacity of 7.32 ± 0.01 mg/g. These findings emphasize the influence of pyrolysis temperature on biochar properties and highlight the potential of waste fruit peel-derived biochar for effective methylene blue adsorption.

Keywords : Lime peel, Kumquat peel, Salak peel, Pyrolysis, Biochar, Methylene blue

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำโครงงานขอขอบพระคุณ ผศ. ดร. วารุณี ลิ่มมั่น อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล แขวงวิศวกรรมพลังงาน อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน รศ. ดร. ธัชพล จุ้งเจริญ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล แขวงวิศวกรรมพลังงาน อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม และ นางสาวอรสา ชูละเอียด นักวิทยาศาสตร์ ที่ให้คำปรึกษาในด้านของข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการทำงาน คำแนะนำและแนวคิดในการดำเนินงานวิจัย อันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย จนกระทั่งการวิจัยครั้งนี้สำเร็จเรียบร้อยด้วยดี

ขอขอบพระคุณเพื่อนร่วมรุ่นทุกท่านในการช่วยเหลือการทำงาน ตลอดจนบุคคลที่มีส่วนเกี่ยวข้องที่คอยให้การสนับสนุนและให้กำลังใจเสมอมา ขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ธราเทพ คำไทย

พรชนก คำจันทร์

มิถุนายน 2566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ

กิตติกรรมประกาศ

สารบัญ

สารบัญตาราง

สารบัญรูป

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์ 3

1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์ 3

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

1.5 วิธีการและขั้นตอนในการดำเนินงาน 4

1.6 สถานที่ทำการวิจัย 5

1.7 แผนการดำเนินงาน 5

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 มะนาว

2.1.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของมะนาว 6

2.1.2 การนำมะนาวไปใช้ประโยชน์ 7

2.1.3 ปริมาณของเสียจากเปลือกมะนาว 8

2.2 ส้มจี๊ด 8

2.2.1 ลักษณะทางพฤษศาสตร์ของส้มจี๊ด 9

2.2.2 การนำส้มจี๊ดไปใช้ประโยชน์ 10

2.2.3 ปริมาณของเสียจากเปลือกส้มจี๊ด 10

2.3 สละ 11

2.3.1 ลักษณะทางพฤษศาสตร์ของสละ 12

2.3.2 การนำสละไปใช้งาน 12

2.3.3 ปริมาณของเสียจากเปลือกสละ 13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไบโอชาร์	14
2.5 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตไบโอชาร์	15
2.6 กระบวนการผลิตไบโอชาร์	15
2.7 กระบวนการไพโรไลซิส	16
2.7.1 ประเภทของกระบวนการไพโรไลซิส	17
2.7.2 พารามิเตอร์ในกระบวนการไพโรไลซิสที่ส่งผลต่อการผลิตไบโอชาร์	19
2.8 การวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอชาร์	20
2.8.1 การวิเคราะห์ร้อยละผลผลิตของไบโอชาร์	21
2.8.2 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของไบโอชาร์	21
2.8.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทำงานของไบโอชาร์	22
2.8.4 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบของไบโอชาร์	23
2.9 สีย้อมเมทีลีนบลู	24
2.9.1 การใช้สีย้อมเมทีลีนบลู	24
2.9.2 ความเป็นพิษของสีย้อมเมทิลีนบลู	25
3.0 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	26
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	29
3.1.1. เศษเปลือกผลไม้	29
3.1.2. เมทิลีนบลู (Methylene Blue)	30
3.1.3. น้ำกลั่น (DI Water)	31
3.1.4. เครื่องวิเคราะห์ Surface area and porosity analyzer ด้วยเทคนิค Gas Adsorption (BET)	31
3.1.5. เครื่องมือ Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR)	31
3.1.6. เครื่องชั่งทศนิยม 3 ตำแหน่ง	32
3.1.7. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง	32
3.1.8. เครื่องปั่น	33
3.1.9. ตะแกรงขนาด 425 micron	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.1.10. เตาอบลมร้อน 34

3.1.11. เครื่องกวนผสม 34

3.1.12. เครื่องวัดค่า pH 35

3.1.13. เครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ 35

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน 37

3.3 กระบวนการและวิธีการดำเนินงาน 38

3.2.1 กระบวนการเตรียมวัตถุดิบสำหรับผลิตไบโอชาร์ 38

3.3.2 กระบวนการวิเคราะห์ค่าร้อยละผลผลิต 38

3.3.3 กระบวนการวิเคราะห์ปริมาณเถ้าของไบโอชาร์ 38

3.3.4 การวัดค่า pH ของไบโอชาร์ 39

3.3.5 กระบวนการดูดซับเมทิลีนบลู 39

3.3.6 กระบวนการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลีนบลู ที่ผ่านการดูดซับด้วยไบโอชาร์ 40

บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ผลการวิเคราะห์ร้อยละผลผลิตของไบโอชาร์ 42

4.2 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ความกว้างรูพรุน และปริมาตรรูพรุนของไบโอชาร์ 43

4.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบของไบโอชาร์ 45

4.4 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ 47

4.4.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกมะนาว ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C, 700 °C 47

4.4.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกส้มจี๊ด ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C, 700 °C 48

4.4.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกสละ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C, 700 °C 49

4.4.4 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกมะนาว - ส้มจี๊ด ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C, 700 °C 51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4.5 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกมะนาว - สละ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C, 700 °C 52

4.4.6 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกส้มจี๊ด - สละ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C, 700 °C 53

4.4.7 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกมะนาว - ส้มจี๊ด - สละ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C, 700 °C 55

4.5 ผลการวิเคราะห์ค่า pH ของไบโอชาร์ 56

4.6 การวิเคราะห์การดูดซับเมทิลีนบลูด้วยไบโอชาร์ประเภทต่าง ๆ 58

4.7 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการดูดซับเมทิลีนบลู และความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู 58

4.8 ผลการวิเคราะห์ค่า pH หลังการดูดซับเมทิลีนบลู 59

4.9 ผลการวิเคราะห์ค่าการดูดซับเมทิลีนที่ความเข้มข้นของไบโอชาร์ที่แตกต่างกัน 60

4.9.1 การวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพการดูดซับเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นของไบโอชาร์ต่างกัน 60

4.9.2 การวิเคราะห์ค่า pH หลังการดูดซับเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นของไบโอชาร์ต่างกัน 61

4.9.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชั่นการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์หลังการดูดซับเมทิลีนบลูจากไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกมะนาว – ส้มจี๊ด – สละ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C 62

บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง 64

5.2 ปัญหาที่พบในการทดลอง 64

5.3 ข้อเสนอแนะ 64

เอกสารอ้างอิง 65

ภาคผนวก 69

ภาคผนวก ก ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ 70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ข ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ความกว้างรูพรุนโดยเฉลี่ย และปริมาตรรูพรุนของไบโอชาร์	72
ภาคผนวก ค ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ของไบโอชาร์	87
ภาคผนวก ง ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์	91
ภาคผนวก จ ผลการวิเคราะห์การดูดซับเมทิลีนบลูของไบโอชาร์	107
ประวัติผู้จัดทำ	114

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	แผนการดำเนินงาน	5
4.1	ค่าเฉลี่ยของร้อยละผลผลิตของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกแต่ละชนิด ที่อุณหภูมิ 500 °C, 700 °C	43
4.2	ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ความกว้างรูพรุนโดยเฉลี่ย และปริมาตรรูพรุน ของไบโอชาร์	43
4.3	การวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกแต่ละชนิด ที่อุณหภูมิ 500 °C และ 700 °C	45
4.4	การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชั่นการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกมะนาว ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C, 700 °C	47
4.5	การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกส้มจี๊ด ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C, 700 °C	49
4.6	การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกสละ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C, 700 °C	50
4.7	การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกมะนาว - ส้มจี๊ด ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C, 700 °C	51
4.8	การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกมะนาว - สละ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C, 700 °C	53
4.9	การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกส้มจี๊ด - สละ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C, 700 °C	54
4.10	การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกมะนาว - ส้มจี๊ด - สละ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C, 700 °C	55
4.11	ค่า pH ของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกแต่ละชนิดที่อุณหภูมิ 500 °C, 700 °C	57
4.12	การวิเคราะห์หมู่งฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์หลังการดูดซับเมทิลีนบลู จากไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกมะนาว- ส้มจี๊ด - สละ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C	62
ก.1	ค่าเฉลี่ยของร้อยละผลผลิตของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกแต่ละชนิดที่อุณหภูมิ 500 °C, 700 °C	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ข.1	ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ความกว้างรูพรุนโดยเฉลี่ย และปริมาตรรูพรุนของไบโอชาร์จากเปลือกมะนาวที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C	73
ข.2	ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ความกว้างรูพรุนโดยเฉลี่ย และปริมาตรรูพรุนของไบโอชาร์จากเปลือกมะนาวที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C	74
ข.3	ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ความกว้างรูพรุนโดยเฉลี่ย และปริมาตรรูพรุนของไบโอชาร์จากเปลือกส้มจี๊ดที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C	75
ข.4	ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ความกว้างรูพรุนโดยเฉลี่ย และปริมาตรรูพรุนของไบโอชาร์จากเปลือกส้มจี๊ดที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C	76
ข.5	ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ความกว้างรูพรุนโดยเฉลี่ย และปริมาตรรูพรุนของไบโอชาร์จากเปลือกสละที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C	77
ข.6	ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ความกว้างรูพรุนโดยเฉลี่ย และปริมาตรรูพรุนของไบโอชาร์จากเปลือกสละที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C	78
ข.7	ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ความกว้างรูพรุนโดยเฉลี่ย และปริมาตรรูพรุนของไบโอชาร์จากเปลือกมะนาว - ส้มจี๊ดที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C	79
ข.8	ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ความกว้างรูพรุนโดยเฉลี่ย และปริมาตรรูพรุนของไบโอชาร์จากเปลือกมะนาว - ส้มจี๊ดที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C	80
ข.9	ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ความกว้างรูพรุนโดยเฉลี่ย และปริมาตรรูพรุนของไบโอชาร์จากเปลือกมะนาว - สละที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C	81
ข.10	ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ความกว้างรูพรุนโดยเฉลี่ย และปริมาตรรูพรุนของไบโอชาร์จากเปลือกมะนาว - สละที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C	82
ข.11	ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ความกว้างรูพรุนโดยเฉลี่ย และปริมาตรรูพรุนของไบโอชาร์จากเปลือกส้มจี๊ด - สละที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C	83
ข.12	ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ความกว้างรูพรุนโดยเฉลี่ย และปริมาตรรูพรุนของไบโอชาร์จากเปลือกส้มจี๊ด - สละที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C	84
ข.13	ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ความกว้างรูพรุนโดยเฉลี่ย และปริมาตรรูพรุนของไบโอชาร์จากเปลือกมะนาว - ส้มจี๊ด - สละที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C	85
ข.14	ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ความกว้างรูพรุนโดยเฉลี่ย และปริมาตรรูพรุนของไบโอชาร์จากเปลือกมะนาว - ส้มจี๊ด - สละที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C	86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
จ.1	ผลการวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของเมทิลีนบลูก่อน – หลังการดูดซับด้วยไบโอชาร์	108
จ.2	ผลการวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพการดูดซับเมทิลีนบลูของไบโอชาร์	109
จ.3	ผลการวิเคราะห์ค่าความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูของไบโอชาร์	110
จ.4	ผลการวิเคราะห์ค่า pH ของสารละลายเมทิลีนบลูก่อนและหลังการดูดซับด้วยไบโอชาร์	111
จ.5	ผลการวิเคราะห์ความสามารถและประสิทธิภาพในการดูดซับเมทิลีนบลูของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกมะนาว - ส้มจี๊ด - สละ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C	112
จ.6	ผลการวิเคราะห์ค่า pH ของสารละลายเมทิลีนบลูก่อนและหลังการดูดซับด้วยไบโอชาร์	113

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	วิธีการและขั้นตอนในการดำเนินงาน	4
2.1	ลักษณะทางกายภาพของผลมะนาว	6
2.2	ลักษณะทางกายภาพของผลส้มจี๊ด	9
2.3	ลักษณะทางกายภาพของผลสละ	11
2.4	กระบวนการผลิตถ่านไบโอชาร์	16
2.5	โครงสร้างโมเลกุลของเมทิลีนบลู	24
3.1	เปลือกมะนาว	29
3.2	เปลือกของส้มจี๊ด	29
3.3	เปลือกสละ	30
3.4	สารเมทิลีนบลู	30
3.5	ถังน้ำกลั่น	31
3.6	เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ Surface area and porosity analyzer	31
3.7	เครื่องมือ Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR)	32
3.8	เครื่องชั่งทศนิยม 3 ตำแหน่ง	32
3.9	เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง	33
3.10	เครื่องปั่นที่ใช้ในการปั่นเปลือกทั้ง 3 ชนิดให้กลายเป็นผง	33
3.11	ตะแกรงขนาด 425 ไมครอน	34
3.12	เตาอบลมร้อน	34
3.13	เครื่องกวนสาร	35
3.14	เครื่องวัดค่า pH	35
3.15	เครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์	36
3.16	ขั้นตอนการดำเนินงาน	37
4.1	หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของไบโอชาร์จากเปลือกมะนาวที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C, 700 °C	48
4.2	หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของไบโอชาร์จากเปลือกส้มจี๊ดที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C, 700 °C	49
4.3	หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของไบโอชาร์จากเปลือกสละที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C, 700 °C	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.4	หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของไบโอชาร์จากเปลือกมะนาว - ส้มจี๊ดที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C, 700 °C	52
4.5	หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของไบโอชาร์จากเปลือกมะนาว – สละที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C, 700 °C	53
4.6	หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของไบโอชาร์จากเปลือกส้มจี๊ด - สละที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C, 700 °C	54
4.7	หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของไบโอชาร์จากเปลือกมะนาว - ส้มจี๊ด - สละ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C, 700 °C	56
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นต่างๆ ของสารละลายเมทิลีนบลูที่ความยาวคลื่น 620 nm	58
4.9	ค่าประสิทธิภาพการดูดซับและค่าความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูของไบโอชาร์แต่ละประเภท	59
4.10	ค่า pH หลังทำการดูดซับเมทิลีนบลูของไบโอชาร์แต่ละประเภท	60
4.11	ผลการวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพการดูดซับเมทิลีนบลูที่ปริมาณไบโอชาร์ต่างๆ	60
4.12	ผลการวิเคราะห์ค่า pH ของสารละลายเมทิลีนบลูหลังการดูดซับที่ไบโอชาร์ต่างๆ	61
4.13	หมู่ฟังก์ชั่นบนพื้นผิวของไบโอชาร์หลังการดูดซับเมทิลีนบลูของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกมะนาว – ส้มจี๊ด - สละ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C	63
ค.1	ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ของไบโอชาร์	88
ง.1	การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกมะนาว ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C	92
ง.2	การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกมะนาว ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C	93
ง.3	การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกส้มจี๊ด ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C	94
ง.4	การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกส้มจี๊ด ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C	95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
ง.5	การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกสละ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 ℃	96
ง.6	การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกสละ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 ℃	97
ง.7	การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกมะนาว - ส้มจี๊ด ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 ℃	98
ง.8	การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกมะนาว - ส้มจี๊ด ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 ℃	99
ง.9	การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกมะนาว - สละ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 ℃	100
ง.10	การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกมะนาว - สละ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 ℃	101
ง.11	การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกส้มจี๊ด - สละ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 ℃	102
ง.12	การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกส้มจี๊ด - สละ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 ℃	103
ง.13	การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกมะนาว - ส้มจี๊ด - สละ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 ℃	104
ง.14	การวิเคราะห์หมู่ฟังกชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกมะนาว - ส้มจี๊ด - สละ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 ℃	105
ง.15	การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์หลังการดูดซับเมทิลีนบลูของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกมะนาว - ส้มจี๊ด - สละ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 ℃	106

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในทุกวันนี้มีการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรโลกอย่างต่อเนื่อง จึงทำให้เกิดความต้องการอาหารที่เพิ่มมากขึ้น [1, 2] ซึ่งการผลิตพืชผลทั้งหมดต่อปีจึงเพิ่มขึ้นตามจำนวนประชากรโลกและความต้องการอาหารที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสูงถึง 4,800 ล้านตัน ในปัจจุบันมีการทำอุตสาหกรรมแปรรูปสินค้าทางการเกษตรมากขึ้น จึงได้เริ่มมีการนำผลไม้ที่หาได้ในพื้นที่ไปทำการแปรรูป ทำให้เกิดเป็นเศษวัสดุเหลือทิ้งจากการแปรรูปสินค้าทางการเกษตร เช่น เปลือกของผลไม้ ทำให้เปลือกของผลไม้กลายเป็นของเสียทางการเกษตรที่ถูกทิ้งสู่สิ่งแวดล้อมเป็นจำนวนมาก [3] เปลือกของผลไม้นับเป็นส่วนหนึ่งของขยะทางการเกษตรที่ไม่มีการนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยทั่วไปวิธีในการกำจัดขยะทางการเกษตรมีหลายวิธี ไม่ว่าจะเป็นการนำไปเป็นวัตถุดิบในการเลี้ยงปศุสัตว์ ใช้เป็นสารอาหารให้แก่พืช และใช้เพิ่มปริมาณคาร์บอนในดิน นอกจากนี้ยังมีการกำจัดขยะทางการเกษตรโดยการเผาทิ้ง ซึ่งเป็นวิธีที่ส่งผลเสียแก่สิ่งแวดล้อมและทำให้กลายเป็นปัญหามลพิษ [4] จากปัญหาเปลือกผลไม้ที่เหลือทิ้ง จึงทำให้เกิดความสนใจที่จะศึกษาเกี่ยวกับการนำเปลือกผลไม้ไปใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยเปลือกของผลไม้ที่เลือกมาศึกษานั้น ได้แก่ เปลือกมะนาว เปลือกส้มจี๊ด และเปลือกสละ เนื่องจากเป็นผลไม้ที่ได้รับความสนใจและได้รับความนิยมในการนำมาแปรรูปเป็นอย่างมาก และมีปริมาณการบริโภคสูง ทำให้เกิดเป็นปริมาณขยะที่เพิ่มมากขึ้น

มะนาว เป็นพืชชนิดหนึ่งที่จัดอยู่ในตระกูลส้ม และได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย [5] โดยในปัจจุบันมีปริมาณผลิตผลอยู่ที่ 143,935 ตัน [6] ซึ่งคิดเป็นปริมาณเปลือก 50-55 % ของปริมาณน้ำหนักทั้งหมด โดยในเปลือกของมะนาวยังเป็นแหล่งสะสมของสารต่าง ๆ เช่น เพคติน ลิโมนิน และเส้นใย [5, 7] ส้มจี๊ด เป็นผลไม้ขนาดเล็ก จัดอยู่ในกลุ่มพรรณไม้เดียวกับมะนาว มีปริมาณผลิตผลอยู่ที่ 90,709 ตัน [2] ซึ่งคิดเป็นปริมาณเปลือก 60-70 % ของปริมาณน้ำหนักทั้งหมด จากการศึกษาพบว่าในเปลือกของส้มจี๊ดนั้นอุดมไปด้วยเส้นใย ซึ่งเหมาะแก่การนำไปแปรรูปต่อเพื่อให้เกิดมูลค่าเพิ่ม [8] นอกจากนี้สละ เป็นผลไม้อีกชนิดหนึ่งที่ให้ผลผลิตตลอดทั้งปี และเป็นพืชที่ได้รับความสนใจทั้งในประเทศและต่างประเทศ โดยในปัจจุบันในประเทศไทยมีปริมาณผลผลิตอยู่ที่ 21,000 ตัน [9] ซึ่งคิดเป็นปริมาณเปลือกประมาณ 10-15% ของปริมาณน้ำหนักทั้งหมด [10] และเพื่อลดปัญหาผลกระทบที่เกิดขึ้น จึงนำขยะที่เกิดขึ้นมาผลิตเป็นถ่านไบโอชาร์ ซึ่งเป็นตัวดูดซับที่ได้รับความสนใจจากนักวิจัยเป็นอย่างมาก เพราะมีประสิทธิภาพสูง ใช้งานง่าย ต้นทุนต่ำ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไบโอชาร์ (Biochar) เป็นวัสดุคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุน ซึ่งผลิตขึ้นจากการแปลงความร้อนทางเคมีของสารอินทรีย์ในสภาวะที่ไร้ออกซิเจน ซึ่งเรียกอีกอย่างว่า กระบวนการไพโรไลซิส [12] คุณสมบัติโดยทั่วไปของไบโอชาร์ ได้แก่ มีพื้นที่ผิวจำเพาะขนาดใหญ่ มีความพรุนสูง เป็นวัสดุคาร์บอนที่มีความเสถียรสูง มีหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ซึ่งมีผลต่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน จึงทำให้ถ่านไบโอชาร์นี้เหมาะสำหรับเป็นวัสดุดูดซับสำหรับการใช้งานด้านสิ่งแวดล้อม [13] นอกจากนี้ในงานวิจัยก่อนหน้าในการผลิตถ่านไบโอชาร์มักจะผลิตจากวัตถุดิบหรือชีวมวลชนิดเดียว แต่ในปัจจุบันมีของเสียทางการเกษตรที่มีปริมาณมากและมีความหลากหลาย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาการผลิตถ่านไบโอชาร์จากการผสมชีวมวลเพื่อศึกษาคุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไป

นอกจากนี้ในปัจจุบันการพัฒนาอย่างรวดเร็วของอุตสาหกรรม การปนเปื้อนของสีย้อมในน้ำเสียของอุตสาหกรรมเสื้อผ้าและสิ่งทอซึ่งเป็นปัญหาสำคัญด้านสิ่งแวดล้อม และเป็นมลพิษที่จัดการได้ยากที่สุดในโรงบำบัดน้ำเสียทั่วไป สีย้อมในน้ำเสียสามารถทำให้เกิดโรคต่างๆ เช่น มะเร็ง โรคโลหิตจาง โรคระบบทางเดินหายใจ เป็นต้น [14] ซึ่งในกระบวนการย้อมนั้นมีการใช้สีย้อมเพียง 5% เท่านั้น และส่วนที่เหลือจะถูกปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งอาจทำให้สิ่งแวดล้อมเสื่อมโทรมลงได้ [15] โดยเมทิลีนบลู (Methylene Blue) เป็นหนึ่งในสีย้อมอินทรีย์ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายไม่ว่าจะเป็นในทางการแพทย์หรือทางอุตสาหกรรม โดยในทางการแพทย์เมทีลีนบลูถูกใช้ในการรักษาสภาวะความดันเลือดต่ำ ส่วนในทางอุตสาหกรรมสีย้อมเมทิลีนบลูถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเสื้อผ้าและสิ่งทอเป็นหลัก เนื่องจากสีย้อมเมทีลีนบลูมีการนำไปใช้ที่หลากหลาย หากไม่ได้มีการจัดการอย่างเหมาะสมจะส่งผลร้ายแรงต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์ได้ มีรายงานว่าสารเคมีชนิดนี้เป็นสารก่อมะเร็งซึ่งไม่สามารถย่อยสลายเองได้ทางชีวภาพ อันตรายต่อสุขภาพที่อาจเกิดขึ้นจากการสัมผัสเมทีลีนบลูมีตั้งแต่ภาวะแทรกซ้อนในทางเดินอาหาร ความผิดปกติของระบบทางเดินหายใจ ความผิดปกติของระบบประสาทส่วนกลาง ปัญหาเกี่ยวกับหัวใจและหลอดเลือด และภาวะแทรกซ้อนในระบบทางเดินปัสสาวะ [16] ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะลดปัญหาขยะจากการบริโภค หรือการแปรรูปผลไม้และปัญหาสีย้อมในน้ำเสีย

ในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิส และศึกษาการผลิตไบโอชาร์จากการผสมชีวมวลทั้งสามชนิดที่มีผลต่อคุณสมบัติของไบโอชาร์ เช่น ปริมาณธาตุองค์ประกอบ พื้นที่ผิวจำเพาะ และหมู่ฟังก์ชันบนพื้นที่ผิวไบโอชาร์ และศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับเมทิลีนบลูด้วยถ่านไบโอชาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์

1.2.1 เพื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิสที่มีผลต่อคุณสมบัติของไบโอชาร์จากเปลือกผลไม้เหลือทิ้ง เช่น เปลือกมะนาว เปลือกส้มจี๊ด เปลือกสละ และการผสมร่วมกันของเปลือกผลไม้

1.2.2 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับเมทิลีนบลูด้วยไบโอชาร์จากเปลือกผลไม้เหลือทิ้ง

1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

1.3.1 วัสดุที่ใช้ในการผลิตไบโอชาร์ คือ เปลือกมะนาว (สายพันธุ์มะนาวแป้น) เปลือกส้มจี๊ด (สายพันธุ์ *Calamansi*) และเปลือกสละ (สายพันธุ์อินโด)

1.3.2 ศึกษาสมบัติของไบโอชาร์ ได้แก่ ร้อยละผลผลิต ปริมาณธาตุองค์ประกอบ พื้นที่ผิวจำเพาะ หมู่ฟังก์ชันบนพื้นที่ผิวไบโอชาร์

1.3.3 ผลิตไบโอชาร์ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 500 °C และ 700 °C ระยะเวลาการไพโรไลซิส 1 h และอัตราการให้ความร้อน 5 °C/min

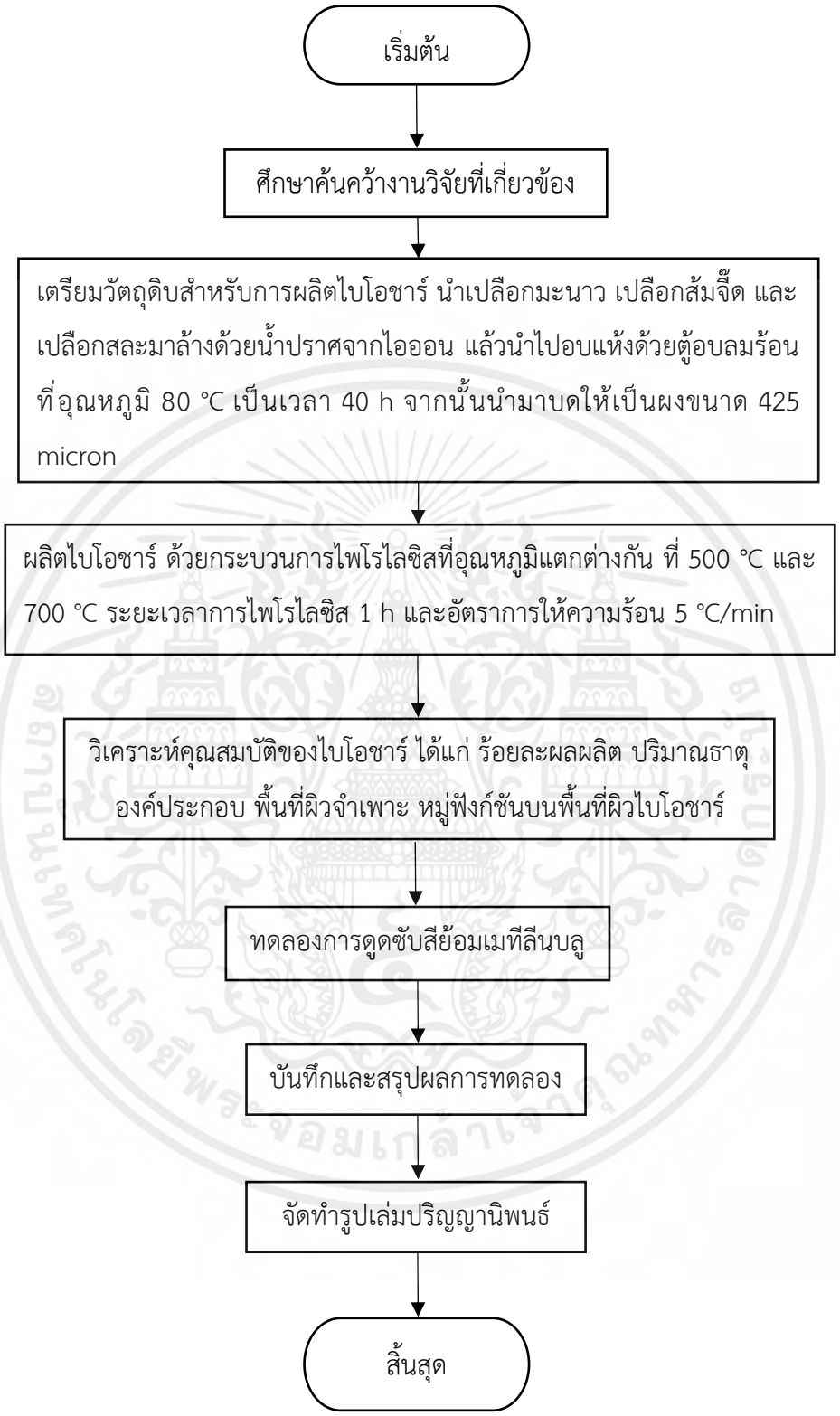
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้นำเปลือกมะนาว เปลือกส้มจี๊ด และเปลือกสละที่เหลือทิ้งจากการเกษตรไปใช้ให้เกิดประโยชน์เพื่อลดปริมาณขยะ

1.4.2 ได้องค์ความรู้ในการผลิตไบโอชาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 วิธีการและขั้นตอนในการดำเนินงาน



รูปที่ 1.1 วิธีการและขั้นตอนในการดำเนินงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 สถานที่ทำการวิจัย

อาคารปฏิบัติการวิศวกรรมเกษตร และห้องปฏิบัติการวิศวกรรมพลังงาน (D301) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

1.7 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

กิจกรรม	ระยะเวลาดำเนินการ 2565-2566									
	ส.ค. 65	ก.ย. 65	ต.ค. 65	พ.ย. 65	ธ.ค. 65	ม.ค. 66	ก.พ. 66	มี.ค. 66	เม.ย. 66	พ.ค. 66
1. ศึกษาค้นคว้างานวิจัยและข้อมูลที่เกี่ยวข้อง	←	→								
2. เตรียมวัตถุดิบสำหรับการผลิตไบโอชาร์		←	→							
3. ผลิตไบโอชาร์			←	→						
4. วิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอชาร์				←	→					
5. ทดลองการดูดซับสีย้อมเมทีลีนบลู						←	→			
6. บันทึกและสรุปผลการทดลอง							←	→		
7. จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์								←	→	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 มะนาว

มะนาว มะนาวกรด หรือ มะนาวเขียว เป็นผลไม้รสเปรี้ยวของมะนาว ซึ่งเป็นไม้พุ่มในตระกูล Rutacea (ตระกูลส้ม) ซึ่งมีอยู่ 2 สายพันธุ์ คือ มะนาวแป้น (Citrus Aurantiifolia) และมะนาวเปอร์เซีย (Citrus Latifolia) [17] มะนาว เป็นพืชตระกูล Citrus Aurantiifolia มะนาวมักจะเก็บเกี่ยวก่อนสุก เปลือกของมะนาวจะเป็นสีเขียว บางและเรียบ ซึ่งสามารถสกัดส่วนประกอบสำคัญของอะโรมาติกออกมาได้ เนื้อของมะนาวมีลักษณะเป็นเป็นสีเขียว ไม่มีเมล็ดหรือมีเมล็ด มีความฉ่ำและเป็นกรด ค่า pH ของมะนาวแป้น คือ 2.1 ถึง 2.4 ในขณะที่ค่า pH ของมะนาวเปอร์เซียต่ำกว่า โดยมีค่า pH อยู่ระหว่าง 3.7 ถึง 3.9 [2, 18, 19]

รูปที่ 2.1 ลักษณะทางกายภาพของผลมะนาว

ที่มา: https://belvoir-university-health.s3.amazonaws.com/media/2020/06/08160241/benefits-of-lime.jpg

2.1.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของมะนาว

2.1.1.1 ลำต้น ต้นมะนาวเป็นต้นไม้เขียวชอุ่มขนาดเล็กถึงขนาดกลาง โดยสามารถเติบโตได้สูงถึง 16 ft มีลักษณะการเจริญเติบโตเป็นพุ่มหนาแน่นและมีทรงพุ่มกลม เปลือกเรียบสีน้ำตาลอมเทา มีรอยนูนเล็กๆ และมีหนามบริเวณกิ่งก้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1.2 ใบ ใบของต้นมะนาวมีรูปร่างเป็นวงรีหรือรูปไข่ ปลายใบแหลม ผิวใบเป็นมันสีเขียวเข้ม วางตัวเรียงสลับกันบนกิ่งและมีพื้นผิวคล้ายหนัง ใบมีความยาวประมาณยาว 2-3 in และมีความกว้าง 1-2 in

2.1.1.3 ดอก ต้นมะนาวจะมีดอกสีขาวขนาดเล็ก มีกลิ่นหอม ซึ่งมักจะมี 5 กลีบและเรียงตัวลักษณะเป็นรูปดาว ดอกมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 in และเติบโตเป็นกระจุกสองถึงหกดอกที่ปลายกิ่ง

2.1.1.4 ผล ผลของมะนาวเป็นผลไม้รสเปรี้ยวขนาดเล็ก ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1-2 in เนื้อมีความฉ่ำและเป็นกรดมีรสเปรี้ยวและขม เป็นผลไม้ที่มีเมล็ดขนาดเล็กมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/4 in

2.1.1.5 การเติบโตและการเพาะปลูก ต้นมะนาวมีถิ่นกำเนิดในเขตร้อนของเอเชีย และปลูกในเชิงพาณิชย์ในหลายพื้นที่ของโลก รวมถึงเม็กซิโก อินเดีย และแคริบเบียน มะนาวเป็นพืชที่ชอบสภาพอากาศที่อบอุ่น ชื้น ต้นมะนาวสามารถขยายพันธุ์ได้โดยการเพาะเมล็ดหรือการตอนกิ่ง นอกจากนี้ยังสามารถปลูกและเก็บไว้เป็นพืชในร่มในสภาพอากาศที่เย็นกว่าได้ [2, 20]

2.1.2 การนำมะนาวไปใช้ประโยชน์

มะนาวเป็นผลไม้สารพัดประโยชน์ที่สามารถนำมาใช้งานได้หลายประเภท โดยการใช้งานจากมะนาวมีดังนี้

2.1.2.1 การใช้ในการทำอาหาร: มะนาวมักใช้ในการปรุงอาหาร โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอาหารเม็กซิกัน เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ และอาหารละตินอเมริกา สามารถใช้ปรุงรสน้ำหมัก น้ำสลัด ซอส และเครื่องจิ้ม รวมถึงของหวานได้

2.1.2.2 การใช้ทำเป็นเครื่องดื่ม: มะนาวเป็นส่วนผสมที่นิยมในค็อกเทลและเครื่องดื่มอื่นๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในรูปของน้ำมะนาวหรือมะนาวฝานเป็นแว่น น้ำมะนาวมักใช้ทำน้ำมะนาวและน้ำผลไม้อื่นๆ

2.1.2.3 การใช้ประโยชน์ด้านการแพทย์ มะนาวมีวิตามินซีสูงและสารต้านอนุมูลอิสระมาก ทำให้ช่วยเพิ่มระบบภูมิคุ้มกันให้แก่ร่างกายและส่งเสริมสุขภาพโดยรวม น้ำมะนาวยังใช้รักษาโรคต่างๆ ได้ เช่น อาการไอ หวัด และปัญหาทางเดินอาหาร

2.1.2.4 การใช้ประโยชน์ในครัวเรือน มะนาวสามารถใช้ทำความสะอาดและดับกลิ่นพื้นผิวได้ โดยเฉพาะในห้องครัวและห้องน้ำ น้ำมะนาวยังสามารถใช้เป็นน้ำยาขจัดคราบตามธรรมชาติและช่วยขจัดสนิมและคราบสกปรก [20, 21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 ปริมาณของเสียจากเปลือกมะนาว

ปริมาณของเสียจากเปลือกมะนาวต่อปีขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น การผลิตและการบริโภคมะนาวทั่วโลก วิธีการใช้มะนาว และแนวทางปฏิบัติในการกำจัดในภูมิภาคต่างๆ จากข้อมูลของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรแห่งประเทศไทย ในปี 2563 มีจำนวนผลผลิตมะนาวในประเทศไทยอยู่ที่ประมาณ 483,930 t. ซึ่งเปลือกของมะนาวคิดเป็น 20% ของน้ำหนักผลมะนาวทั้งหมด ดังนั้นแล้วในปี 2563 มีปริมาณของเสียจากเปลือกมะนาวคิดเป็นปริมาณมากถึง 96,786 t. [22]

โดยรวมแล้ว ปริมาณของเสียที่เกิดจากเปลือกมะนาวขึ้นอยู่กับวิธีการใช้และกำจัด เป็นที่ชัดเจนว่าปริมาณของเสียที่เกิดจากเปลือกมะนาวต่อปีนั้นมีจำนวนมาก ซึ่งทำให้เห็นถึงความสำคัญของการหาวิธีที่ยั่งยืนในการจัดการและนำขยะเหล่านี้กลับมาใช้ใหม่

2.2 ส้มจี๊ด

ส้มจี๊ด (Calamansi) หรือที่เรียกว่ามะนาวฟิลิปปินส์ เป็นผลไม้รสเปรี้ยวที่มีแหล่งกำเนิดในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยเฉพาะฟิลิปปินส์ เป็นผลไม้ทรงกลมที่มีขนาดเล็กประมาณลูกกอล์ฟ ผิวบางเป็นมัน สีเหลืองอมส้ม ปอกเปลือกได้ง่าย เนื้อข้างในฉ่ำและเป็นกรด มีรสชาติที่ผสมผสานระหว่างเปรี้ยวและหวาน [21]

ส้มจี๊ดอุดมไปด้วยวิตามินซี ซึ่งจำเป็นต่อการรักษาระบบภูมิคุ้มกันให้แข็งแรง รวมถึงสารต้านอนุมูลอิสระอื่นๆ นอกจากนี้ยังมีวิตามินเอและบีตลอดจนแร่ธาตุต่างๆ เช่น โพแทสเซียมและแคลเซียม [23]

ส้มจี๊ดสามารถนำไปใช้ในหลากหลายวิธีทั้งในการทำอาหารและทางการแพทย์ ในฟิลิปปินส์เป็นส่วนผสมที่ได้รับความนิยมในอาหารหลายชนิด นอกจากนี้ยังใช้เป็นเครื่องปรุงอาหารโดยคั้นน้ำใส่อาหารหรือผสมกับซีอิ๊วหรือน้ำปลา นอกเหนือจากการใช้ทำอาหารแล้ว ส้มจี๊ดยังใช้ในการแพทย์แผนโบราณ เชื่อกันว่ามีคุณสมบัติต้านเชื้อแบคทีเรีย ต้านเชื้อรา และใช้ในการรักษาโรคต่างๆ รวมถึงอาการไอ เป็นหวัด เจ็บคอ และติดเชื้อทางผิวหนัง น้ำผลไม้ยังใช้ทาเป็นยาปรับสีผิวและระงับกลิ่นกายตามธรรมชาติได้อีกด้วย [24, 25]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.2 ลักษณะทางกายภาพของผลส้มจี๊ด

ที่มา: https://bud.nl/wp-content/uploads/2020/08/Calamansi.jpg

2.2.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของส้มจี๊ด

ส้มจี๊ด (Calamansi) (Citrus x microcarpa) เป็นไม้ยืนต้นที่มีขนาดเล็ก อยู่ในตระกูล Rutaceae มันเป็นลูกผสมระหว่างส้มแมนดาริน (Citrus reticulata) และส้มจี๊ด (Citrus japonica) และมีการปลูกกันอย่างหลากหลายในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้โดยเฉพาะในฟิลิปปินส์ ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของส้มจี๊ดมีลักษณะดังนี้

2.2.1.1 ลำต้น ต้นส้มจี๊ด มีลักษณะเป็นไม้พุ่มมีขนาดเล็ก ซึ่งสูงได้ถึง 3-5 m มีลักษณะกิ่งก้านแตกสาขาคล้ายมงกุฎหนาทึบ ใบมีสีเขียวเข้มเป็นมันวาว มีลักษณะเป็นวงรีหรือรูปไข่ ยาวประมาณ 5-9 cm

2.2.1.2 ดอก ลักษณะดอกของส้มจี๊ด มีลักษณะเป็นดอกไม้สีขาวขนาดเล็ก มีกลิ่นหอม ซึ่งมักออกเป็นดอกเดี่ยวหรือเป็นกระจุกเล็กๆ ดอกมีห้ากลีบ เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 cm

2.2.1.3 ผล ผลส้มจี๊ดมีขนาดเล็ก กลม และมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2-4 cm มีผิวบางเรียบและเป็นมัน เมื่อสุกจะมีสีเขียวสดใส และเมื่อสุกเต็มที่จะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองส้ม เนื้อมีความฉ่ำและเป็นกรด มีรสฝาดและหวานเล็กน้อย ในผลมีเมล็ดขนาดเล็กและแกะออกได้ง่าย

2.2.1.4 ลักษณะการเจริญเติบโต ส้มจี๊ดเป็นพืชที่ไวต่อความเย็นซึ่งต้องการอุณหภูมิที่อบอุ่นและดินที่ระบายน้ำได้ดีจึงจะเติบโตได้ดี ชอบแสงแดดจัดหรือในที่ร่มบางส่วน และโดยทั่วไปจะขยายพันธุ์โดยการเพาะเมล็ด ปักชำ หรือตอนกิ่ง [24]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 การนำส้มจี๊ดไปใช้ประโยชน์

ส้มจี๊ดเป็นผลไม้ที่สามารถนำมาใช้ได้หลากหลาย อาทิเช่นการนำไปทำอาหาร การใช้งานด้านการแพทย์และสุขภาพ การใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องสำอาง เป็นต้น

2.2.2.1 การใช้ประโยชน์ในด้านการทำอาหาร ส้มจี๊ดเป็นส่วนประกอบยอดนิยมในอาหารเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในฟิลิปปินส์ ซึ่งใช้เป็นสารให้รสเปรี้ยวในอาหารหลากหลายประเภท สามารถใช้ปรุงรสซอส น้ำหมัก และซุป นอกจากนี้ยังใช้ทำเครื่องดื่มได้ ซึ่งทำได้โดยการบีบคั้นน้ำจากผลไม้แล้วเจือจางด้วยน้ำและน้ำตาล

2.2.2.2 การใช้ประโยชน์ด้านการแพทย์และสุขภาพ ส้มจี๊ดเป็นผลไม้ที่มีวิตามินซีสูง และมักใช้ในยาแผนโบราณเพื่อรักษาโรคต่างๆ เชื่อกันว่ามีคุณสมบัติต้านเชื้อแบคทีเรีย ต้านไวรัส และมักใช้เพื่อเพิ่มระบบภูมิคุ้มกันและบรรเทาอาการหวัดและไข้หวัดใหญ่

2.2.2.3 การใช้งานในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องสำอาง น้ำมันหอมระเหยที่สกัดจากผลส้มจี๊ดสามารถใช้ในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางได้หลายชนิด เช่น สบู่ แชมพู และโลชั่น เชื่อกันว่ามีคุณสมบัติสมานแผล ต้านสารอนุมูลอิสระ และปกป้องผิวได้ [21, 24]

2.2.3 ปริมาณของเสียจากเปลือกส้มจี๊ด

เปลือกของส้มจี๊ดสามารถนำมาแปรรูปเป็นน้ำมันหอมระเหย ซึ่งสามารถใช้ในผลิตภัณฑ์ต่างๆ หลากหลายไม่ว่าจะเป็นน้ำหอม เครื่องสำอาง และสารทำความสะอาด เปลือกส้มจี๊ดยังสามารถนำมาอบให้แห้งและบดเป็นผง ซึ่งสามารถใช้เป็นสารปรุงแต่งในผลิตภัณฑ์อาหารได้ นอกจากนี้เปลือกส้มจี๊ดสามารถใช้เป็นแหล่งเพคตินธรรมชาติ ซึ่งใช้เป็นสารทำให้เกิดเจลในผลิตภัณฑ์อาหารได้อีกด้วย

ปริมาณของเสียที่เกิดจากเปลือกของส้มจี๊ดขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ไม่ว่าจะเป็นขนาดของอุตสาหกรรมการผลิต วิธีการแปรรูป และวิธีการใช้ประโยชน์ จากข้อมูลของสำนักงานสถิติแห่งประเทศฟิลิปปินส์ ในปี 2565 มีจำนวนผลผลิตมะนาวในประเทศฟิลิปปินส์อยู่ที่ประมาณ 24,900 t ซึ่งโดยทั่วไปแล้วปริมาณกว่า 50% ของน้ำหนักผลส้มจี๊ดเป็นของเสียจากเปลือก ดังนั้นแล้วในปี 2565 มีปริมาณของเสียจากเปลือกส้มจี๊ดคิดเป็นปริมาณมากถึง 12,400 t [26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 สละ

สละ (Salak) หรือที่เรียกว่า Salacca zalacca เป็นพันธุ์ไม้เขตร้อนที่มีถิ่นกำเนิดในประเทศอินโดนีเซียและมาเลเซีย นิยมปลูกเพื่อรับประทานผลเป็นหลัก ซึ่งเรียกว่า ผลสละ หรือ ผลงู เนื่องจากลักษณะผลมีผิวนอกเป็นเกล็ด สละเป็นผลไม้มีรสหวาน เปรี้ยว มีเนื้อสัมผัสคล้ายกับแอปเปิล [9, 27]

ต้นสลักเป็นต้นไม้ขนาดเล็กเรียวยาว สูงได้ถึง 6 m (20 ft) มีลักษณะลำต้นสีน้ำตาลเข้มที่ปกคลุมไปด้วยหนามแหลม ซึ่งช่วยปกป้องต้นไม้จากสัตว์ที่อาจพยายามปีนขึ้นไป ใบเป็นแบบปีกนก มีใบยาวเรียว ยาวได้ถึง 1 m (3 ft) ลักษณะดอกของต้นสละนั้น ดอกมีขนาดเล็กสีเขียวแกมเหลือง ออกเป็นกระจุกที่โคนใบ หลังจากการผสมเกสรแล้ว ดอกเพศเมียจะพัฒนาเป็นผล โดยทั่วไปจะเก็บเกี่ยวเมื่อยังเป็นสีเขียวและไม่สุก ผลสละมีขนาดและรูปร่างประมาณไข่ลูกเล็กๆ มีผิวนอกเป็นเกล็ดสีน้ำตาลแดง ผิวจะแข็งและลอกออกยาก แต่เมื่อปอกเปลือกออกแล้ว สามารถรับประทานผลสดหรือปรุงสุกก็ได้ เนื้อของผลไม้มีสีขาวหรือเหลือง มีเมล็ดบาง ๆ อยู่ตรงกลางซึ่งไม่สามารถนำไปรับประทานได้ [9, 28]

ผลสละเป็นแหล่งวิตามินซีและเอ รวมทั้งมีไฟเบอร์และโพแทสเซียม เป็นที่นิยมใช้ในอาหารอินโดนีเซียและมาเลเซียแบบดั้งเดิม และสามารถรับประทานสด ปรุงสุก หรือแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น แยม น้ำเชื่อม หรือลูกกวาด นอกจากใช้ประกอบอาหารแล้ว ต้นสละยังมีคุณสมบัติเป็นไม้ประดับได้อีกด้วย ลำต้นและใบที่โดดเด่นมักนิยมนำมาใช้ในการจัดสวน และบางครั้งก็ปลูกเป็นไม้ประดับภายในบ้าน

รูปที่ 2.3 ลักษณะทางกายภาพของผลสละ

ที่มา: https://s.isanook.com/wo/0/rp/r/w728/ya0xa0m1w0/aHR0cHM6Ly9zLmlzYW5vb2suY29tL3dvLzAvdWQvMzcvMTg1MDg5L2lzdG9jay0xMjUzNTY5MDc0LmpwZw==.jpg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของสละ

สละ หรือที่รู้จักกันว่า “Snake fruit” เป็นต้นไม้ชนิดหนึ่งในวงศ์ Arecaceae มีถิ่นกำเนิดในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้โดยเฉพาะอินโดนีเซียและมาเลเซียซึ่งนิยมปลูกเพื่อผลของมัน ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ที่สำคัญบางประการของสลักมีดังนี้

2.3.1.1 ลักษณะการเจริญเติบโต สลักเป็นไม้ต้นปาล์มขนาดเล็กถึงขนาดกลาง โดยทั่วไปจะสูงได้ถึง 2-6 m (6-20 ft) มันมีลำต้นเรียวที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10-30 cm (4-12 in) และมีใบเรียงตัวกันมีลักษณะคล้ายมงกุฎหนาแน่นที่ด้านบนลำต้น

2.3.1.2 ใบ ใบของสลักเป็นรูปปีกกา มีกาบใบจำนวนมากเรียงกันเป็นรูปขนนก แผ่นพับมีสีเขียวเข้ม เป็นมัน และมีความยาวประมาณ 30-60 cm (12-24 in)

2.3.1.3 ดอก ลักษณะดอกมีขนาดเล็กและไม่เด่น และเกิดบนก้านใบยาวที่โผล่ออกมาจากใบ ดอกมีขนาดเล็กสีเขียวแกมเหลือง ออกเป็นกระจุกที่โคนใบ หลังจากการผสมเกสรแล้ว ดอกเพศเมียจะพัฒนาเป็นผล โดยทั่วไปจะเก็บเกี่ยวเมื่อยังเป็นสีเขียวและไม่สุก

2.3.1.4 ผล ผลของต้นสละมีขนาดเล็ก กลมถึงรูปรี ขนาดประมาณผลมะเดื่อ ผลมีผิวเป็นเกล็ดคล้ายเกล็ดงู จึงมีชื่อสามัญว่า “ผลงู (Snake fruit)” ผิวเปลือกมีสีน้ำตาลแดงถึงสีน้ำตาลส้ม มีความเหนียวและเป็นเส้นๆ ด้านในมีเนื้อเป็นเยื่อ เนื้อฉ่ำ สีขาวถึงเหลือง มีรสหวานอมเปรี้ยว มีเมล็ดหนึ่งถึงสามเมล็ด ซึ่งมีขนาดใหญ่และมีสีน้ำตาลเข้ม

โดยรวมแล้วสละเป็นพืชตระกูลปาล์มที่มีลักษณะเด่น ลักษณะของผลที่มีเอกลักษณ์และรสชาติอร่อย มีการปลูกอย่างแพร่หลายในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ [9, 27, 28]

2.3.2 การนำสละไปใช้ประโยชน์

สละมีประโยชน์หลากหลายทั้งเป็นอาหารและเป็นพืชสมุนไพร สละสามารถนำไปใช้งานได้ดังนี้

2.3.2.1 การใช้ในการประกอบอาหาร ผลสละเป็นส่วนประกอบที่นิยมในอาหารอินโดนีเซียและมาเลเซียแบบดั้งเดิม สามารถรับประทานสด ๆ ได้ นอกจากนี้ยังนิยมนำมาทำแยม น้ำเชื่อม และลูกกวาด นอกจากนี้ผลสละยังใช้แต่งกลิ่นเครื่องดื่มและของหวานในบางครั้ง

2.3.2.2 การใช้ประโยชน์ทางการแพทย์ ผลสละมีสรรพคุณทางยาหลายอย่างและใช้ในยาแผนโบราณเพื่อวัตถุประสงค์ต่างๆ เชื่อกันว่ามีคุณสมบัติต้านการอักเสบ ต้านเบาหวาน และต้านอนุมูลอิสระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และใช้รักษาโรคต่างๆ เช่น ท้องร่วง เป็นไข้ และความดันโลหิตสูง ผลสละยังใช้เพื่อช่วยในการย่อยอาหารและลดอาการท้องผูก

2.3.2.3 การใช้อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง สารสกัดจากผลสละใช้ในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง เช่น แชมพู ครีมนวดผม และครีมบำรุงผิว เนื่องจากมีคุณสมบัติต้านสารอนุมูลอิสระ เชื่อกันว่าช่วยปกป้องผิวจากมลภาวะในสิ่งแวดล้อม

2.3.2.4 การใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม: เปลือกผลสละมีสารเพคตินซึ่งใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ซึ่งเป็นสารที่ทำให้เกิดเจล นอกจากนี้ยังสามารถนำเมล็ดผลสละมาสกัดน้ำมันซึ่งใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอางได้อีกด้วย

2.3.2.5 การใช้เป็นไม้ประดับ ต้นสละสามารถใช้เป็นไม้ประดับได้ ลำต้นและใบที่โดดเด่นทำให้เป็นที่ชื่นชอบในการนำไปตกแต่งสวน บางครั้งก็ปลูกเป็นไม้ประดับภายในบ้าน

โดยรวมแล้ว สละเป็นพืชสารพัดประโยชน์ที่ใช้ประโยชน์ได้หลากหลายทั้งในทางการแพทย์แผนโบราณและในอุตสาหกรรมสมัยใหม่ เช่น อาหารและเครื่องสำอาง คุณค่าทางโภชนาการและประโยชน์ต่อสุขภาพทำให้เป็นอาหารเสริมที่มีคุณค่า และรสชาติและเนื้อสัมผัสที่เป็นเอกลักษณ์ทำให้เป็นผลไม้ยอดนิยมในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ [28]

2.3.3 ปริมาณของเสียจากเปลือกสละ

ปริมาณของเสียที่เกิดจากเปลือกสละในแต่ละปีอาจแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับจำนวนผลสละที่เก็บเกี่ยวได้ รวมถึงวิธีการแปรรูปที่ใช้ อย่างไรก็ตามจากข้อมูลขององค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ (FAO) พบว่าในปี 2019 ในประเทศอินโดนีเซียมีผลผลิตของผลสละอยู่ที่ประมาณ 630,000 t โดยทั่วไปแล้วปริมาณของเปลือสละคิดเป็นร้อยละ 10-15 ของปริมาณน้ำหนักทั้งหมด ดังนั้นแล้วในปี 2019 ปริมาณของเสียจากเปลือกสละจะมีปริมาณมากถึง 63,000 t [29]

ปริมาณของเสียจากเปลือกสละขึ้นอยู่กับขนาดการผลิตและการแปรรูป เมื่อผลสละถูกนำไปแปรรูปเปลือกมักถูกทิ้งเป็นขยะ อย่างไรก็ตาม บางอุตสาหกรรมได้เริ่มใช้เปลือกในการสกัดเพคติน ซึ่งใช้เป็นสารที่ทำให้เกิดเจลในอุตสาหกรรมอาหาร การสกัดเพคตินจากเปลือกสละสามารถช่วยลดปริมาณของเสียจากสิ่งที่ไม่ถือว่าเป็นของเสีย นอกจากนี้เปลือกสละยังสามารถใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงชีวภาพที่ผ่านการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน กระบวนการนี้เกี่ยวข้องกับการสลายสารอินทรีย์ในเปลือกเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งสามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนได้ สิ่งนี้สามารถช่วยลดของเสียและเป็นแหล่งพลังงานที่ยั่งยืน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไบโอชาร์

ไบโอชาร์เป็นวัสดุคาร์บอนที่ผลิตจากสารอินทรีย์ผ่านกระบวนการที่เรียกว่า กระบวนการไพโรไลซิส ในหลายปีที่ผ่านมามีความสนใจเพิ่มขึ้นในการใช้ไบโอชาร์ ซึ่งเป็นวัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมสำหรับการใช้งานในด้านต่างๆ ไบโอชาร์สามารถผลิตได้จากวัตถุดิบตั้งต้นหลายชนิด ไม่ว่าจะเป็นจากเศษไม้ ของเสียจากการเกษตร และชีวมวลอื่นๆ องค์ประกอบทางการภาพและทางเคมีของไบโอชาร์อาจแตกต่างกันไป โดยทั่วไปไบโอชาร์ประกอบด้วยคาร์บอนในปริมาณสูง ซึ่งมักจะมีปริมาณอยู่ที่ 70-90% โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังมีองค์ประกอบอื่นๆ อีกหลายชนิด เช่น ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) ไนโตรเจน (N) และกำมะถัน (S) ตลอดจนแร่ธาตุและสารประกอบอื่นๆ ในปริมาณน้อย

ไบโอชาร์มีการประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย อาทิเช่นการนำไปใช้ใช้ในการปรับปรุงดิน มีการใช้ไบโอชาร์เพื่อปรับปรุงความอุดมสมบูรณ์ของดิน การกักเก็บน้ำ และการดูดซึมธาตุอาหารของพืช นอกจากนี้ ไบโอชาร์ยังช่วยกักเก็บคาร์บอนในดิน ซึ่งช่วยลดการเปลี่ยนแปลงทางสภาพภูมิอากาศได้โดยการลดปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ การประยุกต์ใช้ไบโอชาร์ในการผลิตพลังงาน เนื่องจากไบโอชาร์ผลิตขึ้นผ่านกระบวนการไพโรไลซิส จึงให้ความร้อนซึ่งเป็นผลพลอยได้ ความร้อนนี้สามารถนำไปใช้ในกระบวนการผลิตพลังงานได้ ไม่ว่าจะโดยการเผาไบโอชาร์เองหรือใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นสำหรับกระบวนการอื่นๆ เช่น การแปรสภาพเป็นแก๊สหรือการเผาไหม้ นอกเหนือจากการประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพของดินและการผลิตพลังงานแล้ว ไบโอชาร์ยังได้รับการศึกษาถึงศักยภาพในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนออกจากน้ำเสีย พื้นที่ผิวสูงและโครงสร้างที่มีรูพรุนของไบโอชาร์ทำให้ถ่านชีวภาพเป็นตัวดูดซับที่มีคุณภาพภาพสำหรับสารมลพิษ

งานวิจัยก่อนหน้าแสดงให้เห็นว่าไบโอชาร์สามารถกำจัดโลหะหนัก ยาฆ่าแมลง และสารพิษอื่นๆ ออกจากน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้เป็นวัสดุที่มีแนวโน้มว่าจะใช้ในระบบบำบัดน้ำ นอกจากนี้ไบโอชาร์ยังแสดงความสามารถในการกำจัดสารอาหารส่วนเกิน เช่น ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสออกจากน้ำเสียทางการเกษตร ซึ่งสามารถช่วยลดผลกระทบของมลพิษจากเศษอาหารต่อระบบนิเวศทางน้ำได้ ข้อดีอีกหนึ่งประการของการใช้ไบโอชาร์สำหรับการบำบัดน้ำคือ ไบโอชาร์เป็นวัสดุหมุนเวียนและยั่งยืน ซึ่งแตกต่างจากวัสดุบำบัดน้ำแบบดั้งเดิมที่ได้มาจากทรัพยากรที่ไม่หมุนเวียน ไบโอชาร์ยังสามารถผลิตได้จากวัตถุดิบตั้งต้นที่หลากหลาย รวมถึงวัสดุเหลือใช้ เช่น ของเหลือใช้ทางการเกษตรและผลพลอยได้จากป่าไม้ ส่งเสริมเศรษฐกิจหมุนเวียนได้ [30]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

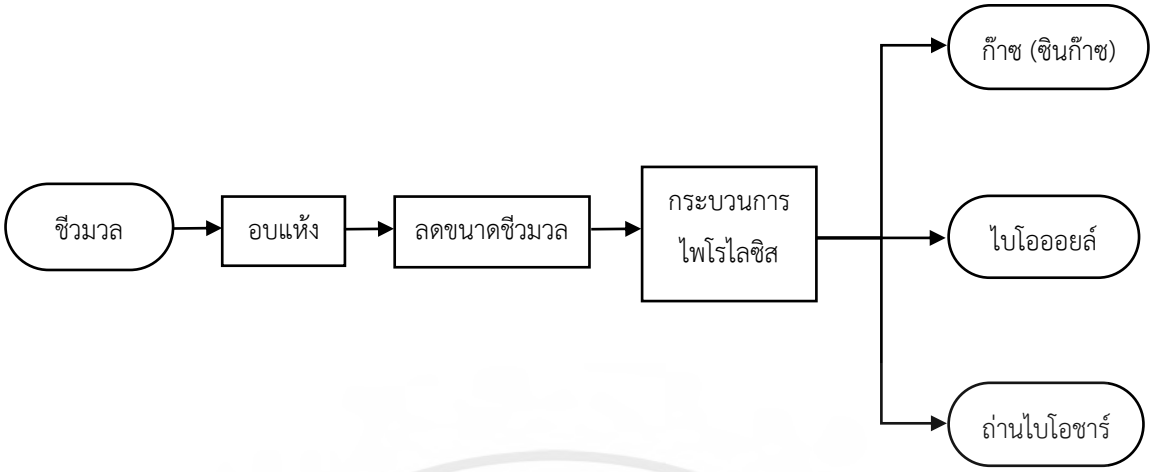
2.5 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตไบโอชาร์

ไบโอชาร์ผลิตจากวัตถุดิบหลากหลายชนิด ซึ่งชีวมวลที่มีส่วนประกอบของเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนินต่างกันอาจส่งผลให้ไบโอชาร์ที่มีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีแตกต่างกันไปด้วย แหล่งที่มาของวัตถุดิบหลักสำหรับการผลิตไบโอชาร์ ได้แก่ ชีวมวล ของเสียจากชุมชน ของเสียจากสัตว์ และเศษพืชที่เหลือทิ้ง วัตถุดิบเหล่านี้อาจเป็นได้ทั้งชีวมวลประเภทลิกโนเซลลูโลสและไม่ใช่ลิกโนเซลลูโลส ชีวมวลประเภทลิกโนเซลลูโลสเป็นแหล่งทรัพยากรชีวภาพที่อุดมสมบูรณ์จากชิ้นส่วนพืชและสัตว์ รวมทั้งกากอุตสาหกรรมเกษตร กากอุตสาหกรรมป่าไม้ พืชพลังงาน ขยะมูลฝอยชุมชน และอื่นๆ ของเสียชีวมวลที่ไม่ใช่ลิกโนเซลลูโลสที่แพร่หลาย ได้แก่ กากตะกอนน้ำเสีย มูลสัตว์ สาหร่าย ขนสัตว์ และกระดูก ซึ่งเป็นการท้าทายความสามารถอย่างมากในการกำจัดและใช้ประโยชน์เพื่อเพิ่มมูลค่าเนื่องจากมีองค์ประกอบที่ซับซ้อนและหลากหลาย เมื่อเปรียบเทียบกับชีวมวลประเภทลิกโนเซลลูโลสแล้ว ชีวมวลที่ไม่ใช่ลิกโนเซลลูโลสส่งผลกระทบต่อ ระบบนิเวศวิทยามากกว่า เนื่องจากมีปริมาณโลหะหนักและเฮทเทอโรอะตอมสูง เช่น ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) และกำมะถัน (S) [31, 32]

2.6 กระบวนการผลิตไบโอชาร์

ชีวมวลสามารถเปลี่ยนเป็นเชื้อเพลิงหมุนเวียนได้ผ่านกระบวนการเปลี่ยนทางชีวเคมีและเทอร์โมเคมี โดยกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีที่สำคัญ ได้แก่ การย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจนและใช้ออกซิเจน การหมักและการย่อยสลายด้วยเอนไซม์หรือกรด แต่ไบโอชาร์ไม่ใช่ผลิตภัณฑ์จากการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมี ดังนั้น วิธีการแปรสภาพทางชีวเคมีจึงไม่มีความสำคัญในการผลิตไบโอชาร์ เทคโนโลยีเทอร์โมเคมีที่สำคัญสำหรับการผลิตไบโอชาร์ ได้แก่ กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าและแบบเร็ว โดยผลผลิตของไบโอชาร์ขึ้นอยู่กับประเภทของกระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าจะใช้เวลานานกว่าและใช้อุณหภูมิปานกลาง (350–550 °C) ในสภาวะไร้ออกซิเจน ส่งผลให้ร้อยละผลผลิตของไบโอชาร์สูงกว่ากระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว หรือกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (ผลผลิตของกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า: 30%, กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว: 12%, และกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน: 10%) [31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 กระบวนการผลิตไบโอชาร์ [32]

2.7 กระบวนการไพโรไลซิส

กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis Process) เป็นกระบวนการสลายตัวด้วยความร้อนที่เกิดขึ้นในสภาวะที่ไร้ออกซิเจนหรือมีออกซิเจนจำกัด เป็นเทอร์โมไลซิสชนิดหนึ่งที่สลายสารอินทรีย์ให้เป็นสารประกอบที่ง่ายกว่า เช่น ก๊าซ ของเหลว และของแข็ง วัสดุที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสสามารถจัดประเภทกว้างๆ ได้ไม่ว่าจะเป็นวัสดุชีวมวลได้มาจากพืช ของเหลือทิ้งมักจากกระบวนการทางอุตสาหกรรม เช่น พลาสติก ยาง รถยนต์ และขยะมูลฝอยชุมชน

วัสดุชีวมวลเป็นวัตถุดิบที่ใช้กันมากที่สุดสำหรับกระบวนการไพโรไลซิส วัสดุเหล่านี้อาจรวมถึงเศษไม้ ของเสียจากการเกษตร พืชพลังงาน และวัสดุจากพืชประเภทอื่นๆ องค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลอาจแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของพืชและสภาวะแวดล้อมที่ปลูก โดยทั่วไปแล้วชีวมวลจะมีส่วนผสมของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน รวมทั้งสารประกอบอื่นๆ เช่น โปรตีน น้ำตาล และน้ำมันในปริมาณที่น้อยกว่า องค์ประกอบที่แน่นอนของมวลชีวภาพสามารถส่งผลต่อร้อยละผลผลิตและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตระหว่างกระบวนการไพโรไลซิส [33]

ของเสียยังนำมาใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นสำหรับกระบวนการไพโรไลซิส วัสดุเหล่านี้อาจรวมถึงพลาสติก ยาง และขยะอุตสาหกรรมประเภทอื่นๆ ส่วนประกอบของวัสดุเหล่านี้อาจแตกต่างกันไป และอาจมีสารเคมีและสารเติมแต่งหลายชนิดที่อาจส่งผลต่อกระบวนการไพโรไลซิส ตัวอย่างเช่น พลาสติกบางประเภทมีคลอรีนหรือสารฮาโลเจนอื่นๆ ซึ่งสามารถปล่อยก๊าซพิษในระหว่างการไพโรไลซิส

กระบวนการไพโรไลซิส โดยทั่วไปจะนำวัตถุดิบจะได้รับความร้อนเพื่อขจัดความชื้นหรือสารประกอบที่ระเหยง่าย โดยทั่วไปจะทำโดยใช้ลมร้อนหรือระบบทำความร้อนประเภทอื่น เมื่อวัตถุดิบตั้งต้นแห้งแล้วจะถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้นในขั้นตอนการไพโรไลซิส อุณหภูมิอาจแตกต่างกันขึ้นอยู่กับประเภทของวัตถุดิบตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ โดยทั่วไปอุณหภูมิจะอยู่ที่ประมาณ 300-800 °C ที่อุณหภูมิสูงเช่นนี้วัตถุดิบตั้งต้นจะแตกตัวเป็นสารประกอบง่ายๆ เช่น ก๊าซ ของเหลว และของแข็ง ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้อาจแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับประเภทของวัตถุดิบและสภาวะของการไพโรไลซิส ตัวอย่างเช่น ชีวมวลบางประเภทอาจผลิตน้ำมันชีวภาพได้มากกว่า ในขณะที่บางชนิดอาจผลิตถ่านชีวภาพได้มากกว่านั่นเอง [34, 35]

ในระหว่างกระบวนการการไพโรไลซิส ลิกนิน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสในวัตถุดิบจะถูกสลายด้วยความร้อนในสภาวะที่ไร้ออกซิเจน เพื่อเป็นการเพิ่มปริมาณคาร์บอนของวัตถุดิบตั้งต้น โดยการกำจัดส่วนที่ไม่ใช่คาร์บอนออก เช่น ออกซิเจน (O) และไฮโดรเจน (H) โดยอุณหภูมิการไพโรไลซิส อัตราการให้ความร้อน อัตราการไหลของไนโตรเจน และระยะเวลาการไพโรไลซิสเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อกระบวนการไพโรไลซิส และเป็นตัวกำหนดลักษณะของผลิตภัณฑ์ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสอีกด้วย

2.7.1 ประเภทของกระบวนการไพโรไลซิส

กระบวนการไพโรไลซิส เป็นกระบวนการสลายตัวด้วยความร้อน เป็นวิธีการที่ให้ความร้อนกับวัตถุดิบในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนเพื่อแตกตัวเป็นโมเลกุลที่เล็กลง กระบวนการนี้ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ กระบวนการไพโรไลซิสแต่ละประเภทมีลักษณะเฉพาะและการนำไปใช้งานที่แตกต่างกัน กระบวนการไพโรไลซิสสามารถจำแนกออกเป็นหลายประเภทตามอุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อน ความดัน และเวลาพักที่ใช้ในระหว่างกระบวนการ

2.7.1.1 กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า (Slow pyrolysis) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่ากระบวนการไพโรไลซิสแบบดั้งเดิม เป็นวิธีการที่ย่อยสลายชีวมวลที่อุณหภูมิต่ำ (300–700 °C) ในสภาวะไร้ออกซิเจน อัตราการให้ความร้อนช้า (5–7 °C/min) และมีระยะเวลาพักนาน (อาจใช้เวลาพักเพียง 5–30 min หรืออาจนานมากถึง 25–35 h) ผลที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า ได้แก่ ไบโอชาร์ (35–45%) ไบโอออยล์ (25–35%) และซินแก๊ส (20–30%) ร้อยละผลผลิตไบโอชาร์ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัตถุดิบและสภาวะของไพโรไลซิส เช่น อุณหภูมิการไพโรไลซิส อัตราการให้ความร้อน ระยะเวลาการไพโรไลซิส และสภาพแวดล้อมของกระบวนการไพโรไลซิส ชีวมวลที่มีปริมาณแร่ธาตุสูงส่งผลให้ร้อยละผลผลิตของไบโอชาร์น้อยลง ไบโอชาร์ที่ได้จากกระบวนกไพโรไลซิสแบบช้าสามารถมีขนาดอนุภาคได้หลากหลาย (5–50 mm) [34, 36]

2.7.1.2 กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast pyrolysis) เป็นกระบวนการทางเคมีความร้อนสำหรับที่ใช้เพื่อเปลี่ยนชีวมวลที่เป็นของแข็งให้เป็นน้ำมันชีวภาพเหลวพลังงานสูง กระบวนการไพโรไลซิส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบเร็วเป็นวิธีการที่ใช้ในการย่อยสลายชีวมวลที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 °C ในสภาวะไร้ออกซิเจน และอัตราการให้ความร้อนมากกว่า 300°C/min กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว ทำให้ได้ไบโอชาร์แบบเร็วภายในเวลาเพียงไม่กี่วินาที กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วให้ผลผลิตเป็นไบโอออยล์ 60% ไบโอชาร์ 20% และซินแก๊ส 20% ในงานวิจัยก่อนหน้าใช้กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วที่อุณหภูมิสูงในช่วง 850–1250 °C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10–200 °C ในช่วงเวลาสั้น ๆ ตั้งแต่ 1 ถึง 10 s พบว่า 60%-75% ของผลผลิตที่เป็นของเหลว 15%-25% ของไบโอชาร์ และ 10–20% ของผลผลิตก๊าซที่ไม่ควบแน่นหรือซินแก๊ส [34, 36]

2.7.1.3 กระบวนการไพโรไลซิสแบบแฟลช (Flash pyrolysis) เป็นกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว วัตถุดิบจะสลายตัวอย่างรวดเร็ว โดยปกติในเวลาน้อยกว่าหนึ่งนาที ที่อุณหภูมิ 1,000 °C และสูงกว่านั้น อัตราการให้ความร้อนที่สูงกว่า 1,000 °C/s กระบวนการไพโรไลซิสแบบแฟลชเป็นกระบวนการไพโรไลซิสที่จะให้ความร้อนแก่วัตถุดิบในอุณหภูมิที่สูงมาก (โดยทั่วไปอยู่ระหว่าง 900 ถึง 1,200 °C) ในช่วงเวลาสั้นๆ (โดยทั่วไปจะน้อยกว่า 2 min) ส่งผลให้เกิดผลผลิตเป็นน้ำมันชีวภาพสูง แต่ในทางกลับกันผลผลิตที่เป็นถ่านไบโอชาร์จะลดลงเป็นอย่างมาก [34, 36]

2.7.1.4 กระบวนการไพโรไลซิสแบบสุญญากาศ (Vacuum pyrolysis) เป็นการสลายตัวด้วยความร้อนของชีวมวลภายใต้สภาวะสุญญากาศหรือความดันค่อนข้างต่ำในสภาวะไร้ออกซิเจน โดยปกติความดันจะถูกควบคุมไว้ที่ระหว่าง 0.5 ถึง 2 bar และรักษาอุณหภูมิไว้ที่ 450–600 °C เช่นเดียวกับกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า กระบวนการไพโรไลซิสในสุญญากาศมีอัตราการให้ความร้อนต่ำ อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกระบวนการไพโรไลซิสทั้งสองแล้วให้ผลผลิตที่แตกต่างกันอย่างมาก เป็นผลมาจากการควบแน่นที่เกิดขึ้นทำให้เกิดการระบายไอที่เกิดขึ้นระหว่างการไพโรไลซิสในสภาวะสุญญากาศอย่างต่อเนื่อง การระบายอย่างรวดเร็วของไอสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการไพโรไลซิสช่วยลดเวลาการคงตัวของไอระเหยลงได้อย่างมาก ทำให้ได้ผลผลิตของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวในปริมาณสูง [36]

2.7.1.5 กระบวนการไพโรไลซิสแบบขั้นกลาง (Intermediate pyrolysis) เป็นกระบวนการไพโรไลซิสที่เกิดจากการรวมกันของกระบวนการไพโรไลซิสที่ช้าและเร็ว มีจุดประสงค์เพื่อสร้างสมดุลระหว่างผลผลิตที่เป็นของแข็งและของเหลว กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าจะมีประสิทธิภาพมากกว่าในการผลิตถ่านจำนวนมาก แต่ได้ผลผลิตที่เป็นของเหลวในปริมาณน้อย ในขณะที่กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วให้ผลผลิตที่เป็นของเหลวมากกว่าผลผลิตที่เป็นถ่าน โดยทั่วไปกระบวนการไพโรไลซิสแบบขั้นกลางจะมีความดันจะอยู่ที่ 1 bar มีอุณหภูมิระหว่าง 500-650 °C โดยมีอัตราการให้ความร้อนระหว่าง 0.1-10 °C/min และเวลาพักระหว่าง 5-17 min ผลผลิตที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบขั้นกลางคือ ของเหลว 40–60% ก๊าซที่ไม่ควบแน่น 20–30% และถ่านไบโอชาร์ 15–25% [36]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.1.6 กระบวนการไฮโดรไพโรไลซิส (Hydropyrolysis) เป็นเทคนิคใหม่ที่ใช้สำหรับการแปลงชีวมวลให้เป็นผลิตภัณฑ์คุณภาพสูงโดยการฉีดไฮโดรเจนหรือวัสดุที่เป็นไฮโดรเจนเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ภายใต้ความดันสูง โดยทั่วไปจะอยู่เหนือความดันบรรยากาศจาก 50 bar เป็น 200 bar อัตราการให้ความร้อน 10–300 °C/s เวลาพักมากกว่า 15 s และอุณหภูมิการไพโรไลซิสอยู่ที่ 350–600 °C โดยพื้นฐานแล้วกระบวนการไฮโดรไพโรไลซิสถือได้ว่าเป็นกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วภายใต้ความกดดันสูงในบรรยากาศที่ผสมด้วยไฮโดรเจนหรือวัสดุที่มีไฮโดรเจนเป็นพื้นฐาน กระบวนการนี้ไม่เหมาะสำหรับการผลิตไบโอชาร์เนื่องจากการนำไฮโดรเจนมาใช้ภายใต้อุณหภูมิและความดันสูงจะทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ ด้วยเหตุนี้ทำให้ปริมาณออกซิเจนในไบโอออยล์ที่ผลิตขึ้นนั้นลดลงและยับยั้งการผลิตไบโอชาร์พร้อมกัน [33, 36]

2.7.2 พารามิเตอร์ในกระบวนการไพโรไลซิสที่ส่งผลต่อการผลิตไบโอชาร์

2.7.2.1 อุณหภูมิไพโรไลซิส อุณหภูมิไพโรไลซิสถือเป็นพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของไบโอชาร์ อุณหภูมิไพโรไลซิสที่ต่ำกว่า 400 °C พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนทั้งหมดจะเปลี่ยนไป เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นคาร์บอน จะเปลี่ยนเป็นผลึกคาร์บอนผ่านการควบแน่น สารระเหยจะถูกกำจัดออกไปมากขึ้น สร้างพื้นที่ซึ่งจะนำไปสู่การแตกร้าวในวัสดุ และเกิดเป็นการสร้างรูพรุนขึ้นมา อัตราการเติบโตของพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนทั้งหมดจะช้าลงเนื่องจากปริมาณเถ้าที่เพิ่มขึ้นพร้อมกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิไพโรไลซิสเพิ่มขึ้นมากกว่า 500 °C ค่าของพื้นที่ผิวยังคงเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าอื่นๆ จะลดลงที่อุณหภูมิสูง ขนาดรูพรุนอาจขยายใหญ่ขึ้น ขนาดรูพรุนที่กว้างขึ้นจะส่งผลให้ปริมาตรรูพรุนโดยรวมใหญ่ขึ้นแต่พื้นที่ผิวลดลง อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิของไพโรไลซิสเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงพอ ซึ่งขึ้นอยู่กับวัตถุดิบตั้งต้นและพารามิเตอร์ไพโรไลซิสอื่นๆ จะเกิดปรากฏการณ์ที่ชื่อว่า "การปิดใช้งานด้วยความร้อน" ส่งผลให้เกิดการหลอมละลายของถ่าน รูพรุนจำนวนมากจะเกิดการการหลอมละลาย การหลอมรวม และการทำให้เป็นคาร์บอน ส่งผลให้ทั้งพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนทั้งหมดลดลง สรุปได้ว่าอุณหภูมิไพโรไลซิสที่ 400–700 °C เป็นช่วงอุณหภูมิไพโรไลซิสที่เหมาะสมสำหรับชีวมวล ซึ่งความเหมาะสมของอุณหภูมิขึ้นอยู่กับประเภทของชีวมวลและพารามิเตอร์อื่นๆ [34, 37]

2.7.2.2 อัตราการให้ความร้อน จะส่งผลต่อพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของไบโอชาร์ โดยทั่วไปแล้วการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นก่อนแล้วค่อยๆ ลดลง สามารถสันนิษฐานได้ว่ามีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนจะมีค่าสูงสุดเมื่ออัตราการให้ความร้อนถึงค่าหนึ่ง อัตราการให้ความร้อนส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนและมวลภายในอนุภาค การถ่ายโอนความร้อนและมวลค่อนข้างช้าที่อัตราการให้ความร้อนต่ำ ในขณะที่อัตราการให้ความร้อนสูงจะมีผลให้การถ่ายโอนความร้อนและมวลเร็วขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตาม อัตราความร้อนที่สูงเกินไป มีแนวโน้มที่จะละลายอนุภาคของถ่านไบโอชาร์และทำให้พื้นผิวไบโอชาร์เรียบ จากการศึกษาพบว่าอัตราการให้ความร้อนระหว่าง 5 ถึง 30 °C/min เป็นอัตราการให้ความร้อนที่เหมาะสมต่อการผลิตไบโอชาร์ [34, 37]

2.7.2.3 ระยะเวลาการไพโรไลซิส เป็นเงื่อนไขที่ต้องนำมาพิจารณาในกระบวนการไพโรไลซิสด้วย โดยจะส่งผลต่อพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของไบโอชาร์ ถ้าหากเลือกระยะเวลาไพโรไลซิสที่เหมาะสมจะได้ค่าสูงสุดพื้นที่ผิวละปริมาตรรูพรุน โดยปกติแล้วจะสังเกตแนวโน้มของการเพิ่มขึ้นก่อนแล้วจึงลดลงของพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุน ตัวอย่างเช่น พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นจาก 46.7 เป็น 98.4 m^2/g เมื่อเวลาพักเพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 60 min และจากนั้นลดลงเป็น 91.4 m^2/g เมื่อเก็บถ่านชีวภาพไว้เป็นเวลา 100 min อย่างไรก็ตามการสัมผัสกับอุณหภูมิสูงเป็นเวลานานเกินไปอาจทำลายโครงสร้างของรูพรุนได้ โดยทั่วไปแล้วระยะเวลาการไพโรไลซิสมักจะถูกเลือกในช่วง 30–120 min ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิไพโรไลซิสและอัตราการให้ความร้อนที่ใช้ [37]

2.7.2.4 อัตราการไหลของแก๊สพาหะ โดยทั่วไปจะใช้ไนโตรเจนเป็นพาหะในกระบวนการไพโรไลซิส พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนทั้งหมดของไบโอชาร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลของแก๊สพาหะที่เพิ่มขึ้น แต่ถ้าอัตราการไหลของแก๊สพาหะสูงขึ้นเกินค่าที่เหมาะสม การเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สพาหะช่วยในการระบายสารระเหยซึ่งเอื้อต่อการก่อตัวของรูพรุน ซึ่งจะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนทั้งหมด เมื่ออัตราการไหลของแก๊สพาหะสูงเกินไปจะทำให้อุณหภูมิของถ่านไบโอชาร์ลดลง ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลงพร้อมกับการปล่อยสารระเหยน้อยลง ส่งผลให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนลดลงไปด้วย ดังนั้นจึงแนะนำให้ใช้อัตราการไหลของแก๊สปานกลาง (50–200 mL/min) ในกระบวนการไพโรไลซิส [37]

2.8 การวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอชาร์

การวิเคราะห์ลักษณะของไบโอชาร์แสดงให้เห็นคุณสมบัติของไบโอชาร์ที่แตกต่างกัน คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่สำคัญ ได้แก่ ความพรุน พื้นที่ผิว และค่า pH โดยทั่วไปไบโอชาร์ประกอบด้วยธาตุต่างๆ เช่น คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) กำมะถัน (S) ออกซิเจน (O) ไนโตรเจน (N) และเถ้า (Ash) คุณสมบัติของไบโอชาร์จะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการผลิตและลักษณะของวัตถุดิบที่นำมาใช้ ตัวอย่างเช่น ในระหว่างการผลิตไบโอชาร์ คาร์บอนที่มีอยู่เดิมจะสูญเสียไปในรูปของ CO_2, CO, CH_4 และไฮโดรคาร์บอนต่างๆ นอกจากนี้ยังเกิดการแตกร้าวและการสลายตัว ยิ่งอัตราส่วน O/C และ H/C ต่ำ การสูญเสียออกซิเจนและไฮโดรเจนระหว่างกระบวนการเผาไหม้ก็จะยิ่งสูงขึ้น จะให้ผลิตภัณฑ์มีองค์ประกอบคาร์บอนสูงขึ้น โดย International Biochar Initiative (IBI) แนะนำให้มีอัตราส่วน H/C อยู่ที่ 0.7 เพื่อแยกความแตกต่างของไบโอชาร์จากชีวมวลที่ยังไม่ได้รับการปรับปรุงทางความร้อนหรือเพียงบางส่วนเท่านั้น ดังนั้นทำให้ต้องมีการเลือก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เงื่อนไขการทำงานและนวัตกรรมที่เหมาะสมเพื่อผลิตไบโอชาร์คุณภาพสูง ค่า pH ของไบโอชาร์จากชีวมวลต่างๆ อยู่ที่ประมาณ 10 และโครงสร้างพื้นผิวระดับจุลภาคของถ่านชีวภาพมีค่าตั้งแต่ประมาณ 3 m^2/g สำหรับถ่านชีวภาพแกลบไปจนถึงประมาณ 500 m^2/g สำหรับถ่านชีวภาพจากไม้ [30]

2.8.1 การวิเคราะห์ร้อยละผลผลิตของไบโอชาร์

ผลผลิตของไบโอชาร์ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลากหลายอย่าง รวมถึงประเภทของวัตถุดิบที่ใช้ อุณหภูมิและระยะเวลาของไพโรไลซิส และสภาวะการทำงานของกระบวนการไพโรไลซิส โดยทั่วไปผลผลิตของไบโอชาร์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสจะอยู่ในช่วง 30% ถึง 50% ของวัตถุดิบตั้งต้น ส่วนที่เหลือของชีวมวลจะถูกแปลงเป็นผลิตภัณฑ์อื่นๆ เช่น ไบโอออยล์และซินแก๊ส ผลผลิตของถ่านชีวภาพอาจแตกต่างกันไปตามลักษณะของวัตถุดิบตั้งต้นและสภาวะไพโรไลซิส ผลผลิตของถ่านชีวภาพอาจได้รับการเปลี่ยนแปลงจากอุณหภูมิไพโรไลซิส โดยทั่วไปอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ผลผลิตของถ่านชีวภาพสูงขึ้น แต่ยังนำไปสู่การย่อยสลายของถ่านชีวภาพในวงกว้างมากขึ้นและคุณภาพของถ่านชีวภาพลดลง ดังนั้น อุณหภูมิไพโรไลซิสที่เหมาะสมจึงขึ้นอยู่กับการใช้งานเฉพาะและคุณสมบัติที่ต้องการของไบโอชาร์ [38]

สมการค่าร้อยละผลผลิตของถ่านไบโอชาร์

$$\text{Biochar yield (\%)} = \frac{m_1}{m_2} \times 100 \quad (1)$$

โดย Biochar yield คือ ร้อยละผลผลิตของไบโอชาร์ (%)

m_1 คือ น้ำหนักของวัตถุดิบตั้งต้น (g)

m_2 คือ น้ำหนักของไบโอชาร์ (g)

2.8.2 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของไบโอชาร์

2.8.2.1 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวของไบโอชาร์

การวิเคราะห์พื้นที่ผิวของไบโอชาร์ทำได้โดยใช้เทคนิค Brunauer-Emmett-Teller (BET) เป็นเทคนิคที่ใช้กันอย่างหลากหลายในการวัดพื้นที่ผิวเฉพาะของไบโอชาร์ วิธีนี้เกี่ยวข้องกับการวัดปริมาณก๊าซที่ดูดซับบนพื้นผิวของไบโอชาร์โดยใช้ความดัน

ในวิธี BET ปริมาณของแก๊สที่ใช้โดยทั่วไปคือไนโตรเจน (N) โดยจะถูกดูดซับลงบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ความดันต่างกัน ปริมาณของแก๊สที่ดูดซับถูกวัดโดยใช้เครื่องวิเคราะห์การดูดซับแก๊ส และข้อมูลจะถูกพล็อตเป็นฟังก์ชันของความดันสัมพัทธ์ ข้อมูลจะถูกวิเคราะห์โดยใช้สมการ BET เพื่อกำหนดพื้นที่ผิวเฉพาะของไบโอชาร์ [33]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์พื้นที่ผิวของ BET เป็นวิธีการที่รวดเร็วและแม่นยำในการระบุพื้นที่ผิวเฉพาะของไบโอชาร์ พื้นที่ผิวจำเพาะเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญต่อคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไบโอชาร์ ความว่องไวต่อปฏิกิริยา และความเสถียร การวิเคราะห์พื้นที่ผิวของ BET ถูกนำมาใช้กันอย่างหลากหลายในการวิจัยและอุตสาหกรรมในการระบุลักษณะเฉพาะของถ่านชีวภาพและวัสดุอื่นๆ [35]

2.8.2.2 การวิเคราะห์ปริมาตรรูพรุนของไบโอชาร์

การวิเคราะห์ปริมาตรรูพรุนของไบโอชาร์ทำได้โดยการใช้เทคนิค Gas adsorption isotherms มักใช้ในการวิเคราะห์ความพรุนของไบโอชาร์ วิธีนี้จะเป็นการวัดปริมาณของก๊าซที่ใช้ในการดูดซับบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ความดันต่างๆ และวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อให้ได้การกระจายขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิว โดยทั่วไปจะวัดโดยใช้เครื่องวิเคราะห์การดูดซับก๊าซ ซึ่งสามารถวัดปริมาณของก๊าซที่ดูดซับบนวัสดุโดยเป็นฟังก์ชันของความดันหรือความดันสัมพัทธ์ ก๊าซที่ใช้บ่อยที่สุดสำหรับการวิเคราะห์การดูดซับก๊าซ ได้แก่ ไนโตรเจน (N) อาร์กอน (Ar) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO)

ในการวัดไอโซเทอร์มของการดูดซับก๊าซตัวอย่างของไบโอชาร์จะถูกใส่ในเครื่องวิเคราะห์การดูดซับก๊าซและไล่ก๊าซออกเพื่อกำจัดก๊าซหรือไอน้ำที่ถูกดูดซับ จากนั้นตัวอย่างจะถูกสัมผัสกับก๊าซที่ความดันต่ำและวัดปริมาณของก๊าซที่ใช้ดูดซับบนพื้นผิวของไบโอชาร์ จากนั้นความดันจะเพิ่มขึ้นทีละขั้น และปริมาณของก๊าซที่ดูดซับในแต่ละความดันจะถูกบันทึก ข้อมูลจะถูกลงจุดเป็นปริมาณของก๊าซที่ดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักหรือต่อหน่วยพื้นที่ผิวของถ่านชีวภาพตามฟังก์ชันของความดันหรือความดันสัมพัทธ์

2.8.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทำงานของไบโอชาร์

2.8.3.1 เทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพ เพื่อใช้ในการระบุและหาปริมาณประเภทของหมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏบนพื้นผิวของไบโอชาร์ เทคนิค FTIR ทำงานโดยการวัดการดูดกลืนแสงอินฟราเรดโดยพันธะเคมีที่มีอยู่ในตัวอย่าง

เทคนิค FTIR เกี่ยวข้องกับการส่งลำแสงอินฟราเรดผ่านตัวอย่างไบโอชาร์และวัดปริมาณแสงที่ถูกดูดกลืนที่ความยาวคลื่นต่างๆ จากนั้นแสงที่ถูกดูดกลืนจะถูกนำมาใช้เพื่อสร้างสเปกตรัม ซึ่งแสดงความเข้มของการดูดกลืนตามฟังก์ชันของความยาวคลื่น สเปกตรัมอินฟราเรดของไบโอชาร์ให้ข้อมูลเกี่ยวกับหมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนพื้นผิวของไบโอชาร์ หมู่ฟังก์ชันแต่ละหมู่มีสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่ไม่ซ้ำกัน ใช้เพื่อระบุประเภทและจำนวนของหมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนพื้นผิวของไบโอชาร์ ตัวอย่างเช่น การมีอยู่ของหมู่คาร์บอกซิล (-COOH) หรือหมู่คาร์บอนิล (-C=O) สามารถระบุได้โดยลักษณะพีคที่ประมาณ 1,700 cm^{-1} และ 1,600 cm^{-1} ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกเหนือจากการระบุหมู่ฟังก์ชันแล้ว FTIR ยังสามารถใช้เพื่อกำหนดระดับของการทำงาน หรือจำนวนของหมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏบนพื้นผิวของไบโอชาร์ ซึ่งสามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบความเข้มของพีคการดูดซับกับสารประกอบอ้างอิงที่รู้จัก [33, 35]

2.8.4 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบของไบโอชาร์

2.8.4.1 CHNS analysis

การวิเคราะห์ CHNS เป็นวิธีการวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบที่ใช้ในการหาปริมาณคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ไนโตรเจน (N) และกำมะถัน (S) ของตัวอย่าง โดยทั่วไปจะใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ รวมถึงไบโอชาร์

การวิเคราะห์ CHNS เป็นการวิเคราะห์ที่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้ของตัวอย่างในเตาเผาที่อุณหภูมิสูงภายใต้สภาวะควบคุม ซึ่งจะแปลง C, H, N และ S ทั้งหมดในตัวอย่างเป็นออกไซด์ที่เกี่ยวข้อง จากนั้นก๊าซที่เกิดขึ้นจะถูกส่งผ่านชุดดักจับและตัวตรวจจับ ซึ่งช่วยให้สามารถวัดปริมาณของ C, H, N และ S ที่มีอยู่ในตัวอย่างได้ โดยทั่วไปปริมาณของแต่ละองค์ประกอบจะแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักรวมของตัวอย่าง การวิเคราะห์ CHNS สามารถให้ข้อมูลที่มีค่าเกี่ยวกับองค์ประกอบของตัวอย่าง ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการทำความเข้าใจคุณสมบัติและการใช้งาน ตัวอย่างเช่น ในกรณีของไบโอชาร์ การวิเคราะห์ CHNS สามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับปริมาณคาร์บอน ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญสำหรับการพิจารณาศักยภาพของการใช้ไบโอชาร์เพื่อใช้เป็นตัวดูดซับ [35, 36]

2.8.4.2 การหาค่าปริมาณเถ้าของไบโอชาร์

ปริมาณเถ้าของไบโอชาร์ เป็นวัสดุอนินทรีย์ที่หลงเหลืออยู่หลังจากที่ส่วนประกอบอินทรีย์ถูกเผาออกไปแล้ว วิธีที่ใช้กันทั่วไปในการหาค่าปริมาณเถ้าคือมาตรฐาน ASTM D2866 วิธีนี้เกี่ยวข้องกับการให้ความร้อนกับน้ำหนักของไบโอชาร์ โดยจะนำไบโอชาร์ไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 550 °C เป็นเวลา 2 h ซึ่งจะเผาไหม้ส่วนประกอบอินทรีย์และทิ้งเถ้าอนินทรีย์ไว้ จากนั้นเถ้าที่ได้จะถูกทำให้เย็นลงในเครื่องดูดความชื้นและชั่งน้ำหนักเพื่อหาปริมาณเถ้าเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักไบโอชาร์ดั้งเดิม

สมการหาค่าปริมาณเถ้าของไบโอชาร์

$$\text{Ash content (\%)} = \frac{A_2}{A_1} \times 100 \quad (2)$$

โดย Ash content คือ ร้อยละปริมาณเถ้าของไบโอชาร์ (%)

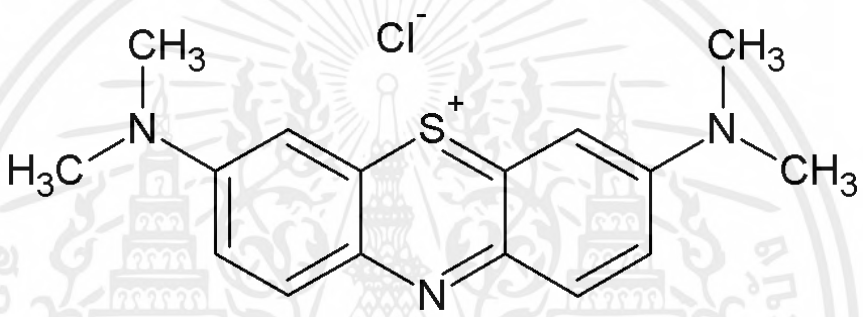
A_1 คือ น้ำหนักเถ้า (g)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A_2 คือ น้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่าง (g)

2.9 สีย้อมเมทีลีนบลู

สีย้อมเมทิลีนบลู (Methylene Blue Dye) เป็นสารประกอบเคมีเฮทเทอโรไซคลิกแอโรแมติก (heterocyclic aromatic compound) มีน้ำหนักโมเลกุลและสูตรทางเคมีเท่ากับ 319.85 g/mol และ $C_{16}H_{18}ClN_3S$ ตามลำดับ สีย้อมเมทิลีนบลูเป็นสีย้อมสีน้ำเงิน มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมสิ่งทอในฐานะสารให้สีเส้นใย และในด้านการแพทย์ในฐานะสารย้อมสี และยังมีการใช้เพื่อวัตถุประสงค์ในการป้องกันและรักษาโรค [16]



รูปที่ 2.5 โครงสร้างโมเลกุลของเมทิลีนบลู [39]

2.9.1 การใช้สีย้อมเมทีลีนบลู

การใช้สีย้อมเมทิลีนบลูนั้นสามารถใช้งานได้อย่างหลากหลาย ในทางการแพทย์ยาต้านมาเลเรียที่สังเคราะห์ได้เร็วที่สุดคือเมทิลีนบลู ซึ่งได้รับการทดสอบเมื่อปลายศตวรรษที่ 19 เมทิลีนบลูยังพบการใช้อย่างแพร่หลายในทางการแพทย์ซึ่งใช้สำหรับการรักษาผู้ป่วยเด็กและผู้ใหญ่ที่ได้รับการวินิจฉัยว่าเป็นโรคเมทฮีโมโกลบิน (โรคเลือดที่มีเมทฮีโมโกลบินในระดับที่ผิดปกติ) การใช้งานทางการแพทย์อื่นๆ ของเมทิลีนบลู ได้แก่ การใช้กรักษาสภาวะความดันเลือดต่ำ การใช้เพื่อการรักษาสภาวะขาดออกซิเจน และการไหลเวียนโลหิตที่เพิ่มขึ้นอย่างผิดปกติในผู้ที่เป็นโรคตับแข็งและอื่นๆ

ในทางอุตสาหกรรมสีย้อมเมทิลีนบลูถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเสื้อผ้าและสิ่งทอเป็นหลัก โดยใช้สำหรับการย้อมสีผ้าต่างๆ นอกจากนี้ยังใช้สำหรับย้อมกระดาษและหนัง ในอุตสาหกรรมอาหารสีย้อมเมทิลีนบลูถูกใช้เป็นสารเติมแต่งอาหาร และเป็นตัวกระตุ้นความไวในการออกซิเดชันด้วยแสงของสารประกอบอินทรีย์ในทางการแพทย์ จุลชีววิทยา และการวินิจฉัยโรค ถึงแม้ว่าสีย้อมเมทิลีนบลูมีการใช้งานและมีประโยชน์หลากหลาย แต่ยังมีรายงานว่าสีย้อมเมทิลีนบลูเป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์ เนื่องจากมีความเป็นพิษสูง ทำให้เป็นภัยคุกคามต่อระบบนิเวศและสุขภาพของมนุษย์ได้ [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.2 ความเป็นพิษของสีย้อมเมทิลีนบลู

เนื่องจากสีย้อมเมทิลีนบลูมีการใช้งานหลากหลาย หากไม่ได้รับการจัดการอย่างเหมาะสมอาจส่งผลกระทบร้ายแรงต่อสุขภาพของมนุษย์ได้ มีรายงานว่าสารเคมีชนิดนี้ก่อมะเร็งและเป็นพิษต่อทารกในครรภ์ อุตสาหกรรมการผลิต เช่น สิ่งทอ สี ยา เครื่องสำอาง ฯลฯ ที่ใช้สีย้อมรวมถึงสีย้อมเมทิลีนบลู ในกระบวนการผลิตอาจมีการปล่อยผลิตภัณฑ์ดังกล่าวจำนวนมากสู่สิ่งแวดล้อมในรูปของขยะ จากการสำรวจพบว่า 67% ของอุตสาหกรรมที่มีการใช้สีย้อมเป็นอุตสาหกรรมเสื้อผ้าและสิ่งทอ ซึ่งทุกการผลิตเส้นใย 1 ตันส่งผลให้มีปริมาณน้ำเสียถูกทิ้งสู่สภาพแวดล้อมมากถึง 120 m^3

จากการปล่อยน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรม เกิดผลกระทบเป็นอย่างมากต่อน้ำใต้ดิน สัตว์น้ำ จุลินทรีย์ที่มีประโยชน์ และสุขภาพของมนุษย์ เนื่องจากปริมาณของเมทิลีนบลูมีความเข้มข้นสูง เมทิลีนบลูเป็นสารก่อมะเร็งที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้เนื่องจากลักษณะความเสถียรของวงแหวนแอโรแมติกในโครงสร้างโมเลกุลของเมทีลีนบลู ความเสี่ยงต่อสุขภาพที่อาจเกิดขึ้นจากการสัมผัสเมทีลีนบลูมีตั้งแต่ภาวะแทรกซ้อนในทางเดินอาหาร ความผิดปกติของระบบทางเดินหายใจ ความผิดปกติของระบบประสาทส่วนกลาง ปัญหาเกี่ยวกับหัวใจและหลอดเลือด และภาวะแทรกซ้อนในระบบทางเดินปัสสาวะ นอกจากนี้การสัมผัสเมทีลีนบลูทางผิวหนังโดยตรง อาจส่งผลให้ผิวหนังแดงและคัน และอาจทำให้เกิดเนื้อตายบริเวณผิวหนังได้ ในด้านของการสืบพันธุ์ของมนุษย์ การสัมผัสกับสารละลายเข้มข้นของเมทีลีนบลูเป็นเวลานาน ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการเคลื่อนที่ของสเปิร์มในทางลบอีกด้วย นอกจากนี้เมทีลีนบลูมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูง (~8.4×10^4 $Lmol^{-1}cm^{-1}$ ที่ 664 nm) ซึ่งอาจส่งผลให้การส่องผ่านของแสงแดดลดลง ดังนั้นการมีเมทีลีนบลูในน้ำอาจส่งผลเสียต่อกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงและระดับความต้องการออกซิเจนซึ่งส่งผลต่อระบบนิเวศในน้ำ [16]

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Liao et al. (2022) ได้ทำการศึกษาของเสียจากการเกษตร 3 ชนิด ได้แก่ ไม้ไผ่ แกลบ และซังข้าวโพด โดยเตรียมไบโอชาร์ จะเตรียมที่อุณหภูมิไพโรไลซิสตั้งแต่ 300-600 °C โดยได้ศึกษากลไกที่สัมพันธ์กันระหว่างกระบวนการเตรียม ลักษณะทางเคมีและทางกายภาพ คุณสมบัติการดูดซับ ความเสถียรของไบโอชาร์ และต้นทุนที่ใช้ในการผลิต ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิไพโรไลซิสเพิ่มขึ้น ผลผลิตของไบโอชาร์ลดลง ในขณะที่ความเสถียรและความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น การวิเคราะห์พบว่าเมื่อเทียบกับต้นทุนการผลิตแล้วไบโอชาร์จากแกลบที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสอุณหภูมิ 500 °C มีความสามารถในการดูดซับ Pb^{2+} และ Cu^{2+} เท่ากับ 292.73 และ 84.29 mg/s ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Qin et al. (2020) ได้ทำการศึกษาผลผลิต องค์ประกอบ โครงสร้าง และสัณฐานวิทยาบนพื้นผิวของไบโอชาร์จากเปลือกเมล็ดสน (Pine nut shell : PNS) โดยเตรียมไบโอชาร์ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 400-700 ℃ และความดันไพโรไลซิสที่แตกต่างกันในช่วง 0.1–2.0 MPa ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิไพโรไลซิสจะช่วยเพิ่มค่าความร้อนขั้นสูง (HHV) ของไบโอชาร์ และการเพิ่มความดันไพโรไลซิสจะช่วยเพิ่มผลผลิตของไบโอชาร์ และกลุ่มการทำงานของพื้นผิว ผลของจลนพลศาสตร์การดูดซับแสดงให้เห็นว่า PNSB550 และ PNSB1.0 มีความสามารถในการดูดซับ Pb^{2+} สูงสุดคือ 237.3 mg/g

Wang et al. (2021) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิไพโรไลซิสที่ส่งผลต่อความสามารถใรการดูดซับ Pb (II) ในสารละลายที่เป็นน้ำของไบโอชาร์จากฟางฝ้าย โดยฟางฝ้ายถูกเตรียมเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตไบโอชาร์ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิสที่แตกต่างกัน (300, 400, 500, 600, 700 ℃) โดยใช้ระยะเวลาไพโรไลซิส 2 h ผลการวิจัยพบว่าอุณหภูมิไพโรไลซิสจะมีอิทธิพลมากที่สุดต่อความสามารถในการดูดซับ ที่อุณหภูมิต่ำอัตราการดูดซับของไบโอชาร์ค่อนข้างช้า แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอัตราการดูดซับของไบโอชาร์จะค่อนข้างเร็ว เป็นผลมาจากกลุ่มฟังก์ชันการทำงานที่แตกต่างกัน ไบโอชาร์ที่ได้จากฟางฝ้ายที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 600 ℃ ที่ pH=5.5 มีความสามารถในการดูดซับ Pb (II) สูงสุดที่ 124.7 mg/g

Muhammad et al. (2022) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ โครงสร้าง และความสามารถในการดูดซับของไบโอชาร์ที่ได้จากขยะสีเขียว (Cynodon dactylon L.) โดยของเสียสีเขียวถูกเตรียมที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 400, 600 และ 800 ℃ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ และโครงสร้างมีความหลากหลายขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของไพโรไลซิส โดยเมื่ออุณหภูมิไพโรไลซิสเพิ่มขึ้น กลุ่มฟังก์ชันของพื้นผิวจะหลุดออกไป โครงสร้างจึงมีรูพรุนมากขึ้น (ปริมาตรรูพรุน 0.089 ± 0.001) ออกไซด์ของโลหะยังคงสม่ำเสมอ และไบโอชาร์เปลี่ยนสภาพเป็นด่างมากขึ้น (pH 11.9 ± 0.2) . นอกจากนี้เมื่ออ้างถึงประสิทธิภาพการดูดซับสำหรับองค์ประกอบที่อาจเป็นพิษ ด้วยความสามารถในการดูดซับในการทดลองสูงถึง 33.7 mg/g และอัตราการกำจัดสูงถึง 96% สำหรับสารละลายที่มีโลหะหลายชนิด ความสามารถในการดูดซับของไบโอชาร์จะถูกไพโรไลซิสที่อุณหภูมิสูง (800 ℃) สูงกว่าไบโอชาร์ที่ถูกไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่ำ (400 ℃) อย่างมีนัยสำคัญ จากคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ โครงสร้าง และประสิทธิภาพการดูดซับของไบโอชาร์ ดังนั้นอุณหภูมิไพโรไลซิสที่เหมาะสมอยู่ที่ 800 ℃

Zhang et al. (2020) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิไพโรไลซิสที่ส่งผลต่อผลผลิต และคุณสมบัติทางเคมีและทางกายของไบโอชาร์ โดยได้ผลิตถ่านชีวภาพจากวัตถุดิบตั้งต้น 4 ชนิด (ฟางข้าวสาลี ฟางข้าวโพด ฟางเรพ และฟางข้าว) ไบโอชาร์ถูกเตรียมที่อุณหภูมิไพโรไลซิสที่ 300, 400, 500 และ 600 ℃ ระยะเวลาการไพโรไลซิส 1 h ผลการวิจัยพบว่าผลผลิตของไบโอชาร์ทั้งหมดลดลงอย่างสม่ำเสมอเมื่ออุณหภูมิไพโรไลซิสเพิ่มขึ้น และลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิพโรไลซิสมากกว่า 400 ℃ ไบโอชาร์ที่ได้จากฟางข้าวมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลผลิตสูงกว่าเนื่องจากมีปริมาณเถ้าสูงกว่า อุณหภูมิไพโรไลซิสมีผลอย่างมากต่อคุณสมบัติของไบโอชาร์ แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์เชิงลบกับ H, O, H/C, O/C, (O+N)/C และหมู่ฟังก์ชัน ในขณะที่มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับ C, Ash, pH, การนำไฟฟ้า และความขรุขระของพื้นผิว อุณหภูมิไพโรไลซิสที่สูงขึ้นมีประโยชน์ต่อการก่อตัวของโครงสร้างพื้นผิวของไบโอชาร์

Adesemuyi et al. (2020) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของอุณภูมิไพโรไลซิสที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับไนเตรตไอออนออกจากสารละลายที่เป็นน้ำของไบโอชาร์ที่ผลิตจากหญ้าช้าง และลักษณะทางเคมีและทางกายภาพของไบโอชาร์ โดยหญ้าช้างถูกเตรียมที่อุณหภูมิไพโรไลซิสแตกต่างกันที่ 400 °C และ 600 °C ผลการวิจัยพบว่าผลผลิตของไบโอชาร์ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 400 °C และ 600 °C เท่ากับ 41.40 % และ 32.25 % ตามลำดับ ไบโอชาร์ทั้งสองมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก ความสามารถในการอุ้มน้ำ ความเสถียรของคาร์บอน และความพรุนที่ดี และมีความสามารถในการดูดซับสูงสุด เท่ากับ 140.7 และ 237.5 mg/g ตามลำดับ ดังนั้นไบโอชาร์ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 600 °C มีความสามารถในการดูดซับไนเตรตไอออนออกจากน้ำดีกว่าไบโอชาร์ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 400 °C

Ji et al. (2019) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของไบโอชาร์ที่ผลิตจากใบไม้ร่วง และความสามารถในการดูดซับเมทีลีนบลู อุณหภูมิไพโรไลซิส โดยไบโอชาร์ถูกเตรียมที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C อัตราการให้ความร้อน 3°C/min และมีระยะเวลาการไพโรไลซิส 2 h ผลการวิจัยพบว่าไบโอชาร์มีความสามารถในการดูดซับสูงสุด 101.27 mg/g ที่อุณหภูมิ 303 K และค่า pH = 12 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นที่ผิวของไบโอชาร์พบว่าไบโอชาร์มีโครงสร้างที่มีรูพรุน มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง และอุดมไปด้วยหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว นอกจากนี้การวิเคราะห์ทางอุณหพลศาสตร์พิสูจน์ว่ากระบวนการดูดซับเมทิลีนบลูเกิดขึ้นได้เองและเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ดังนั้นไบโอชาร์ที่ผลิตจากใบไม้ร่วงนี้สามารถนำมาใช้ในการกำจัดน้ำเสียจากสีย้อมได้ดี

Baharim et al. (2022) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูในสารละลายที่เป็นน้ำด้วยไบโอชาร์ที่ผลิตจากต้นกล้วย โดยต้นกล้วยถูกเตรียมที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C ความเข้มข้นของเมทิลีนบลูเริ่มต้นที่ 25 ppm ปริมาณตัวดูดซับ 0.25 g ใช้ระยะเวลาในการดูดซับ 90 min ผลการวิจัยพบว่าการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูจะมีประสิทธิภาพการดูดซับเมื่อค่า pH=6 เมื่อความเข้มข้นของเมทีลีนบลูเพิ่มขึ้นจาก 25 ppm เป็น 150 ppm ปริมาณของเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 6.77 – 52.04 mg/g ความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่ 55.25 mg/g และมีประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดมากถึง 97.6% ดังนั้นไบโอชาร์จาต้นกล้วยมีประสิทธิภาพในการกำจัดเมทิลีนบลูออกจากสารละลายที่เป็นน้ำ

Roy et al. (2022) ได้ทำการพัฒนาตัวดูดซับไบโอชาร์ต้จากเปลือก Citrus macroptera (CMPs) โดยใช้กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า เพื่อใช้เป็นตัวดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูในสารละลายที่เป็นน้ำ โดยไบโอชาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถูกเตรียมที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 350 °C อัตราการให้ความร้อน 6 °C/min และระยะเวลาการไพโรไลซิส 3 h ผลการวิจัยพบว่าไบโอชาร์มีหมู่ฟังก์ชันการทำงานที่แตกต่างกันเช่น -OH, COOH, -CO, R-OH, ฟีนอล และควิโนน ไบโอชาร์มีโครงสร้างเป็นรูพรุนที่มีรอยแตกเหมือนอุโมงค์ นอกจากนี้ที่ pH=8 มีประสิทธิภาพการดูดซับ 85% โดยใช้เวลาในการดูดซับ 75 min ความสามารถในการดูดซับสูงสุด คือ 139.7 mg/g แสดงให้เห็นว่าไบโอชาร์ที่ได้จาก CMPs มีศักยภาพในการกำจัดสีย้อมจากน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1. เศษเปลือกผลไม้

3.1.1.1. เปลือกมะนาว

ใช้ผลิตไบโอชาร์ ซึ่งได้มาจากร้านขายน้ำผลไม้ โดยเป็นเปลือกที่เหลือทิ้งจากการคั้นน้ำผลไม้ จากสถานที่โดยรอบสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

รูปที่ 3.1 เปลือกมะนาว

3.1.1.2. เปลือกส้มจี๊ด

ใช้ผลิตเป็นไบโอชาร์ ซึ่งได้มาจากโรงงานขายน้ำส้มจี๊ดคั่นสด โดยเป็นเปลือกที่เหลือทิ้งจากการคั้นน้ำผลไม้ จากโรงงานในอำเภอเมืองชุมพร

รูปที่ 3.2 เปลือกของส้มจี๊ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1.3. เปลือกสละ

ใช้ผลิตไบโอชาร์ ซึ่งได้มาจากร้านขายน้ำผลไม้ โดยเป็นเปลือกที่เหลือทิ้งจากการคั้นน้ำผลไม้ จากสถานที่โดยรอบสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

รูปที่ 3.3 เปลือกสละ

3.1.2. เมทิลีนบลู (Methylene Blue)

เมทิลีนบลู เป็นสารประกอบเคมีเฮทเทอโรไซคลิกแอโรแมติก (heterocyclic aromatic compound) มีน้ำหนักโมเลกุลและสูตรทางเคมีเท่ากับ 319.85 g/mol และ $C_{16}H_{18}ClN_3S$ ตามลำดับ เมทิลีนบลูเป็นสีย้อมสีน้ำเงิน

รูปที่ 3.4 สารเมทิลีนบลู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3. น้ำกลั่น (DI Water)

รูปที่ 3.5 ถังน้ำกลั่น

3.1.4. เครื่องวิเคราะห์ Surface area and porosity analyzer ด้วยเทคนิค Gas Adsorption (BET) ยี่ห้อ Micromeritics รุ่น TriStar II 3020

เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนของตัวอย่าง เป็นเทคนิคการวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิว โดยอาศัยเทคนิคการแทนที่พื้นที่ผิว หรือรูพรุนด้วยแก๊สไนโตรเจน

รูปที่ 3.6 เครื่องมือวิเคราะห์ Surface area and porosity analyzer

ที่มา: https://www.sci.nu.ac.th/slcs/clients/roomlist_clients.php

3.1.5. เครื่องมือ Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR)

วิเคราะห์โครงสร้างสารในช่วง wavenumbers 4000 – 400 cm^{-1}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.7 เครื่องมือ Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR)

ที่มา: https://www.sci.nu.ac.th/slcs/clients/roomlist_clients.php

3.1.6. เครื่องชั่งทศนิยม 3 ตำแหน่ง

แบรนด์ Sartorius รุ่น BSA224S-CW ผลิตภัณฑ์จาก Sartorius ประเทศเยอรมัน

รูปที่ 3.8 เครื่องชั่งทศนิยม 3 ตำแหน่ง

ที่มา: http://www.merittech.co.th/index.php?lay=show

&ac=cat_show_pro_detail&cid=42241&pid=183993

3.1.7. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง

แบรนด์ Sartorius รุ่น BSA224S-CW ผลิตภัณฑ์จาก Sartorius ประเทศเยอรมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.9 เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง

ที่มา: https://www.adm-advance.com/13986004/brand-sartorius-model-bsa224s-cw

3.1.8. เครื่องปั่น

รูปที่ 3.10 เครื่องปั่นที่ใช้ในการปั่นเปลือกทั้ง 3 ชนิดให้กลายเป็นผง

3.1.9. ตะแกรงขนาด 425 micron (ยี่ห้อ Endecotts, England ขนาดของรูตะแกรง 425 micron)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.11 ตะแกรงขนาด 425 micron

3.1.10. เตาอบลมร้อน (Memmert Universal Oven UF450 ประเทศเยอรมนี)

รูปที่ 3.12 เตาอบลมร้อน

ที่มา: https://www.memmert.com/products/heating-drying-ovens/universal-oven/UF450/

3.1.11. เครื่องกวนผสม (ยี่ห้อ IKA ประเทศเยอรมัน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.13 เครื่องกวนสาร

ที่มา: http://www.merittech.co.th/index.php?lay=show&ac=cat_show_pro_detail&pid=195495

3.1.12. เครื่องวัดค่า pH (HI2002-02, Hanna)

รูปที่ 3.14 เครื่องวัดค่า pH

ที่มา: https://www.hannathailand.com/wp-content/uploads/2022/07/HI2002.jpg[2]

3.1.13. เครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์

สำหรับการตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสง

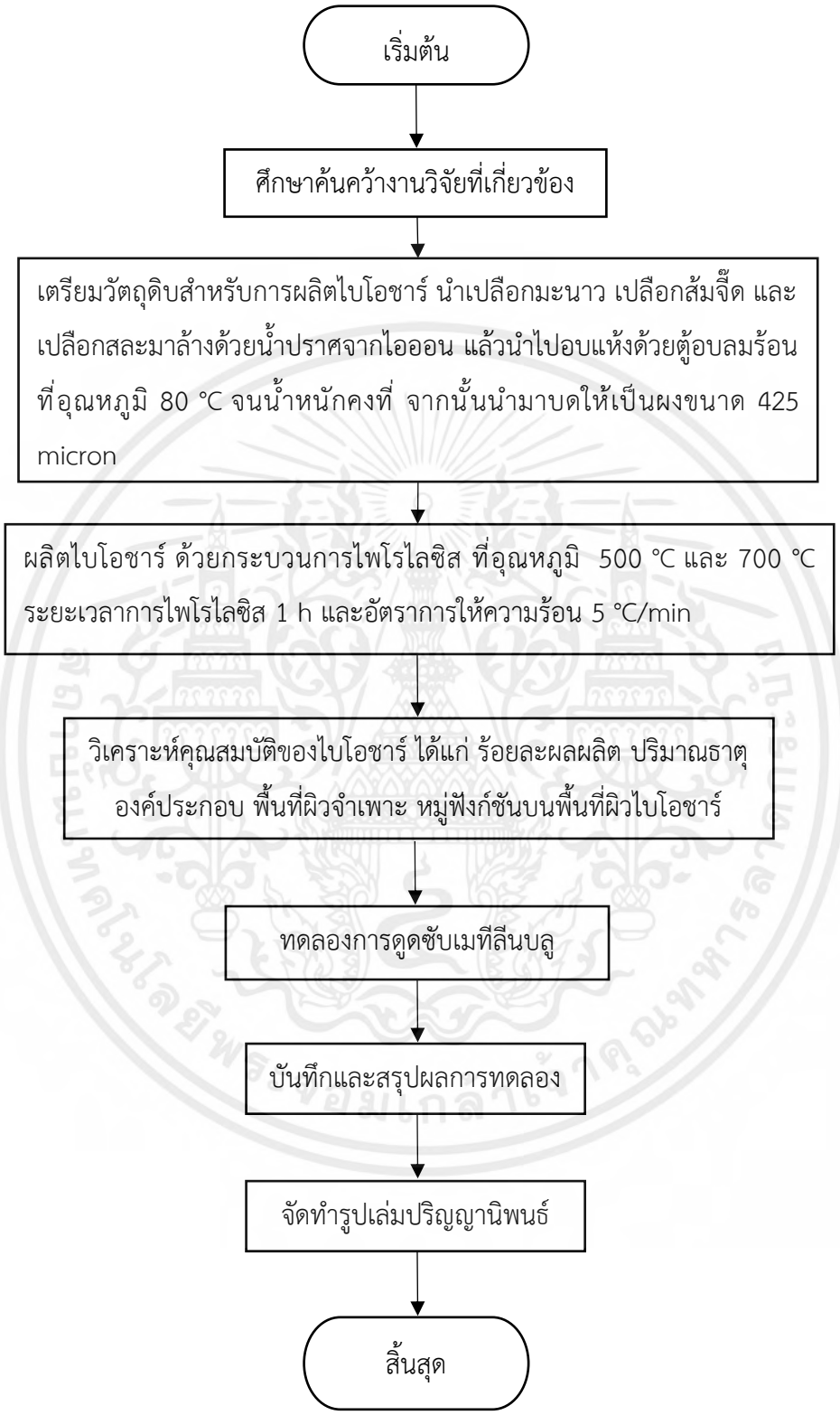
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.15 เครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์

ที่มา: https://www.directindustry.com/prod/jasco-europe/product-30625-1752893.html

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน



รูปที่ 3.16 ขั้นตอนการดำเนินงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 กระบวนการและวิธีการดำเนินงาน

3.3.1 กระบวนการเตรียมวัตถุดิบสำหรับผลิตไบโอชาร์

3.3.1.1 ทำล้างทำความสะอาดวัตถุดิบทั้งสามชนิด

3.3.1.2 นำไปอบแห้งโดยนำเข้าตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 80 °C จนน้ำหนักคงที่

3.3.1.3 นำตัวอย่างของเปลือกแต่ละชนิดไปปั่นให้เป็นผงขนาด 425 ไมครอน

3.3.1.4 นำผงของเปลือก ปริมาณ 10 g แต่ละชนิดใส่ลงไปในถ้วยเผา

3.3.1.5 นำตัวอย่างเข้าเตาเผาไพโรไลซิส โดยเผาที่อุณหภูมิ 500 °C และ 700 °C ที่ระยะเวลาในการไพโรไลซิส 1 h

3.3.1.6 ทิ้งไว้ให้เตาเผาเย็นลงประมาณ 24 h จากนั้นนำออกมาเพื่อชั่งน้ำหนักของไบโอชาร์ที่ได้ เพื่อวิเคราะห์ร้อยละผลผลิตที่ได้

3.3.2 กระบวนการวิเคราะห์ค่าร้อยละผลผลิต

3.3.2.1 ชั่งน้ำหนักของไบโอชาร์ก่อนเผา จากนั้นบันทึกค่า

3.3.2.2 ชั่งน้ำหนักของไบโอชาร์หลังเผา จากนั้นบันทึกค่า

3.3.2.3 ทำการคำนวณค่าร้อยละผลผลิตด้วยสมการ (1)

$$\frac{B_1}{B_0} \times 100\% \qquad (1)$$

โดยที่ B_0 คือ น้ำหนักไบโอชาร์ก่อนเผา (g)

B_1 คือ น้ำหนักไบโอชาร์หลังเผา (g)

3.3.3 กระบวนการวิเคราะห์ปริมาณเถ้าของไบโอชาร์

3.3.3.1 นำถ้วย Crucible ออกจากตู้อบลมร้อนที่ผ่านการอบไว้ 12 h ที่อุณหภูมิ 105 °C

3.3.3.2 นำถ้วย Crucible เข้าไปเก็บในโถดูดความชื้น 12 h

3.3.3.3 นำถ้วย Crucible ออกจากโถดูดความชื้น แล้วนำไปชั่งในเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง จากนั้นบันทึกค่า

3.3.3.4 ใช้ช้อนตักสารตักไบโอชาร์ลงในถ้วย Crucible จากนั้นบันทึกค่าน้ำหนักของตัวอย่างไบโอชาร์ก่อนเผา ทำจนครบทุกตัวอย่าง

3.3.3.5 นำถ้วย Crucible ที่มีตัวอย่างไปเข้าตู้อบ โดยอบที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นระยะเวลา 3 h

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3.6 เมื่อครบกำหนดทำการปิดเครื่องจากนั้นทิ้งในถ้วยและตัวอย่างเย็นเป็นระยะเวลา 1 d

3.3.3.7 นำถ้วย Crucible ออกมาใส่ไว้ในโถดูดความชื้นเป็นระยะเวลา 30 min

3.3.3.8 เมื่อครบกำหนดนำถ้วย Crucible ไปชั่งบนเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง จากนั้นทำการบันทึกค่า

3.3.3.9 จากนั้นทำการคำนวณค่าปริมาณเถ้าด้วยสมการ (2)

$$\frac{U_1}{U_0} \times 100\% \qquad (2)$$

โดยที่ U_0 คือ น้ำหนักถ้วยก่อนเผา (g)

U_1 คือ น้ำหนักถ้วยหลังเผา (g)

3.3.4 การวัดค่า pH ของไบโอชาร์

3.3.4.1 นำไบโอชาร์ใส่ลงในบีกเกอร์ จากนั้นเติมน้ำกลั่นให้ได้อัตราส่วน 1:20 (m/v) ทำการกวนผสมเป็นระยะเวลา 1 h

3.3.4.2 เมื่อทำการกวนผสมครบตามระยะเวลาที่กำหนดให้ปล่อยให้ตกตะกอนเป็นระยะเวลา 5 min

3.3.4.3 จากนั้นนำไปทำการวัดค่า pH ด้วยเครื่องวัดค่า pH ทำการบันทึกค่า

3.3.5 กระบวนการดูดซับเมทิลีนบลู

3.3.5.1 การเตรียมมสารละลายเมทิลีนบลูเพื่อหาค่าการดูดกลืนแสงมาตรฐานที่ความเข้มข้นต่างๆ

3.3.5.1.1 เตรียมสารละลายเมทิลีนบลู โดยเตรียมที่ความเข้มข้น 100 ppm ใส่ในขวดสีชา

3.3.5.1.2 เจือจางสารละลายเมทิลีนบลูเข้มข้น จาก 100 ppm เป็นสารละลายเมทิลีนบลูเจือจางที่ 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 2, 4, 6, 8 และ 10 ppm จากนั้นเทใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 25 ml

3.3.5.1.3 นำสารละลายข้างต้นไปทดสอบที่เครื่อง UV-VIS Spectrophotometer (V-750 UV-Vis, ประเทศอิตาลี) เพื่อหาค่าการดูดกลืนแสงของเมทิลีนบลู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.5.1.4 นำค่าที่ได้ไปสร้างกราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู

3.3.5.2 การดูดซับเมทีลีนบลูที่ความเข้มข้น 10 ppm ด้วยไบโอชาร์

3.3.5.2.1 เตรียมเมทิลีนบลูเจือจางที่ความเข้มข้น 10 ppm จากสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 100 ppm ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 250 mL

3.3.5.2.2 แบ่งสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 10 ppm ใส่บีกเกอร์ขนาด 100 mL ที่ปริมาตร 15 mL

3.3.5.2.3 เตรียมไบโอชาร์ที่ความเข้มข้น 1 g/L ใส่ลงในบีกเกอร์ที่มีเมทิบลู 15 mL

3.3.5.2.4 นำสารละลายเมทิลีนบลูที่ผสมไบโอชาร์แล้วไปใส่ในหลอดเซนติฟิวก์

3.3.5.2.5 นำหลอดเซนติฟิวก์ไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 rpm ระยะเวลา 24 h จากนั้นพักที่ไว้ 30 นาที

3.3.6 กระบวนการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลีนบลูที่ผ่านการดูดซับด้วยไบโอชาร์

3.3.6.1 เตรียมเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

3.3.6.1.1 เซ็ตคพารามิเตอร์ของเครื่องไว้ที่ 620 nm จากนั้นเซ็ต zero

3.3.6.1.2 เตรียมแบลงค์โดยนำน้ำกลั่นใส่ลงในคิวเวทท์จำนวน 2 คิวเวทท์ และใส่เข้าไปในเครื่อง

3.3.6.1.3 เซ็ตค่าแบลงค์ในเครื่อง จากนั้นนำแบลงค์ออกจำนวน 1 คิวเวทท์

3.3.6.2 เตรียมการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสง

3.3.6.2.1 นำสารละลายเมทิลีนบลูจากหลอกเซนติฟิวก์ใส่บีกเกอร์ขนาด 100 ml จากนั้นแบ่งใส่คิวเวทท์ตัวอย่างละ 3 คิวเวทท์

3.3.6.2.2 นำคิวเวทท์ของตัวอย่างใส่ลงในเครื่องครั้งละ 1 คิวเวทท์ จากนั้นวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของแต่ละตัวอย่างในเครื่อง

3.3.6.2.3 บันทึกผลการวิเคราะห์

3.3.6.3 วิเคราะห์ผลการดูดซับเมทีลีนบลู

3.3.6.3.1 นำค่าการดูดกลืนแสงของแต่ละตัวอย่างไปแทนค่าในสมการกราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู เพื่อหาค่าความเข้มข้นของเมทีลีนบลูหลังการดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.6.3.2 วิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพการดูดซับเมทิลีนบลูจากสมการ (3)

$$\text{ประสิทธิภาพการดูดซับ (\%)} = \frac{C_0 - C}{C_0} \times 100 \quad (3)$$

โดยที่ C_0 คือ ความเข้มข้นของเมทิลีนบลูเริ่มต้น (ppm)

C คือ ความเข้มข้นของเมทิลีนบลูหลังดูดซับ (ppm)

3.3.6.3.3 วิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูจากสมการ (4)

$$\text{ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)} = \frac{(C_0 - C) \times V_{Sol}}{M_{ads}} \times 10 \quad (4)$$

โดยที่ C_0 คือ ความเข้มข้นของเมทิลีนบลูเริ่มต้น (ppm)

C คือ ความเข้มข้นของเมทิลีนบลูหลังดูดซับ (ppm)

V_{sol} คือ ปริมาตรเมทิลีนบลูที่ใช้ในการดูดซับ (L)

M_{ads} คือ มวลของตัวดูดซับ (g)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

จากการดำเนินการทดลองตามกระบวนการวิจัย ทำให้ได้ข้อมูลของผลการทดลองที่จะนำมาวิเคราะห์ โดยในส่วนของข้อมูลจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

ตอนที่ 1 ข้อมูลคุณสมบัติของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกเปลือกมะนาว เปลือกส้มจี๊ด เปลือกสละ และไบโอชาร์ที่ทำจากการผสมกันของเปลือกมะนาว เปลือกส้มจี๊ด และเปลือกสละ

ตอนที่ 2 ผลการวิเคราะห์เมื่อนำไบโอชาร์แต่ละประเภทไปทำการดูดซับเมทิลีนบลู

ตอนที่ 1 ข้อมูลคุณสมบัติเกี่ยวกับไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกเปลือกมะนาว เปลือกส้มจี๊ด เปลือกสละ และไบโอชาร์ที่ทำจากการผสมกันของเปลือกมะนาว เปลือกส้มจี๊ด และเปลือกสละ

4.1 ผลการวิเคราะห์ร้อยละผลผลิตของไบโอชาร์

ผลการวิเคราะห์ค่าร้อยละผลผลิตของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกมะนาว เปลือกส้มจี๊ด เปลือกสละ และไบโอชาร์ที่ทำจากการผสมกันของเปลือกมะนาว เปลือกส้มจี๊ด และเปลือกสละ ที่อุณหภูมิ 500 °C และ 700 °C ทำให้ได้ข้อสรุปว่าที่อุณหภูมิ 500 °C ค่าร้อยละผลผลิตของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกสละนั้นมีค่า 36.300 ซึ่งมากที่สุดในบรรดาไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกประเภทอื่น ๆ และที่อุณหภูมิ 700 °C ค่าร้อยละผลผลิตของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกสละนั้นมีค่า 34.405 ซึ่งมากที่สุดในบรรดาไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกประเภทอื่น ๆ นั้นแสดงให้เห็นว่าไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกสละนั้นได้ค่าร้อยละผลผลิตที่มากที่สุดทั้งอุณหภูมิ 500 °C และ 700 °C

อุณหภูมิไพโรไลซิสส่งผลต่อค่าร้อยละผลผลิตของไบโอชาร์ โดยเมื่ออุณหภูมิไพโรไลซิสเพิ่มขึ้นจาก 500 เป็น 700 °C จะเห็นได้ว่าค่าร้อยละผลผลิตของไบโอชาร์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C จะมีการสลายตัวสารอินทรีย์ไม่มากนัก แต่ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C สารอินทรีย์จะเกิดการสลายตัวมากกว่า ปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสของวัตถุดิบจะถูกสลายตัว และเหลือไบโอชาร์ที่มีส่วนประกอบของลิกนินที่สลายตัวยากกว่า ทำให้ค่าร้อยละผลผลิตของไบโอชาร์ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C มีปริมาณน้อยกว่าไบโอชาร์ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยของร้อยละผลผลิตของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกแต่ละชนิด ที่อุณหภูมิ 500 °C และ 700 °C

Sample	Yield (%)	
	500 °C	700 °C
LB	29.19 ± 1.17	28.91 ± 1.50
KB	27.36 ± 0.26	27.08 ± 1.59
SB	36.53 ± 0.70	34.41 ± 0.29
LKB	29.30 ± 1.41	26.97 ± 0.58
LSB	31.49 ± 0.33	30.28 ± 0.15
KSB	32.77 ± 1.21	30.88 ± 0.67
LKSB	30.49 ± 0.23	29.29 ± 0.09

4.2 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ความกว้างรูพรุนโดยเฉลี่ย และปริมาตรรูพรุนของไบโอชาร์

ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของไบโอชาร์ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C และ 700 °C ผลการวิเคราะห์พบว่าอุณหภูมิไพโรไลซิสมีอิทธิพลต่อขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของไบโอชาร์ โดยเมื่ออุณหภูมิไพโรไลซิสสูงขึ้นไบโอชาร์ส่วนใหญ่ในการทดลองจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้น แต่ไบโอชาร์ที่ผลิตจากชีวมวลบางชนิดเมื่ออุณหภูมิไพโรไลซิสเพิ่มขึ้น พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของไบโอชาร์จะลดลง ด้วยเหตุนี้ไม่เพียงแต่อุณหภูมิไพโรไลซิสจะมีผลต่อพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของไบโอชาร์เท่านั้น แต่ชนิดของชีวมวลที่นำมาใช้ผลิตไบโอชาร์ก็ยังส่งผลต่อพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนเช่นกัน โดยไบโอชาร์ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนสูงสุดคือ ไบโอชาร์ชาร์ที่ทำจากเปลือกสละ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500°C โดยมีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน เท่ากับ 70.847 m^2/g และ 0.027 cm^3/g ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ความกว้างรูพรุนโดยเฉลี่ย และปริมาตรรูพรุนของไบโอชาร์

Sample	Specific surface area (m^2/g)	Adsorption average pore width (nm)	Total volume in pore (cm^3/g)
LB500	0.681	44.852	2.4×10^{-4}
LB700	3.861	44.000	1.7×10^{-3}
KB500	0.758	47.300	2.1×10^{-4}
KB700	2.830	15.848	1.1×10^{-3}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sample	Specific surface area (m^2/g)	Adsorption average pore width (nm)	Total volume in pore (cm^3/g)
SB500	70.874	12.757	2.7×10^{-2}
SB700	34.671	14.495	1.3×10^{-2}
LSB500	1.656	48.631	4.6×10^{-4}
LSB700	16.648	10.189	6.6×10^{-3}
LKB500	0.234	62.865	2.5×10^{-4}
LKB700	1.073	53.743	3.1×10^{-4}
KSB500	4.171	53.802	1.3×10^{-3}
KSB700	4.035	34.441	1.5×10^{-3}
LKSB500	20.431	0.002	6.1×10^{-3}
LKSB700	32.687	0.003	1.1×10^{-2}

การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิไพโรไลซิสส่งผลต่อพื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดรูพรุนเฉลี่ยในการดูดซับ และปริมาตรรูพรุนของไบโอชาร์ โดยเมื่ออุณหภูมิไพโรไลซิสเพิ่มขึ้นจาก 500 เป็น 700 °C จะเห็นได้ว่าพื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรรูพรุนของไบโอชาร์เพิ่มขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C เกิดการคาร์บอไนเซชันและมีการสลายตัวของสารอินทรีย์มากกว่า ทำให้เกิดการก่อตัวของไบโอชาร์ที่มีคาร์บอนสูง เกิดการก่อตัวของ micropores, mesopores และ macropore จากการแตกตัวของพันธะคาร์บอน ส่งผลให้มีการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวและปริมาตรของรูพรุน ในทางกลับกันเมื่ออุณหภูมิไพโรไลซิสเพิ่มขึ้นจาก 500 เป็น 700 °C ความกว้างของรูพรุนเฉลี่ยในการดูดซับจะลดลง เนื่องจากที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C เกิดการสลายตัวน้อยกว่า ทำให้รูพรุนที่ก่อตัวขึ้นมีขนาดใหญ่และมีขนาดของรูพรุนเฉลี่ยในการดูดซับที่สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบของไบโอชาร์

ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบของไบโอชาร์ ได้แก่ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ออกซิเจน เถ้า และอัตราส่วนอะตอม (O/C, H/C, และ (O+N)/C) ของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกแต่ละชนิด ที่อุณหภูมิ 500 ℃ และ 700 ℃

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกแต่ละชนิด ที่อุณหภูมิ 500 ℃ และ 700 ℃

Sample	Element (%)					Atomic ratio		
	C	H	N	O	Ash	O/C	H/C	(O+N)/C
LB500	69.62	1.72	1.29	8.92	18.44	0.025	0.128	0.147
LB700	69.85	0.71	1.44	9.70	18.29	0.010	0.141	0.161
KB500	71.61	1.72	1.68	9.01	15.97	0.024	0.126	0.149
KB700	71.13	0.65	1.71	9.30	17.20	0.009	0.131	0.155
SB500	73.68	1.51	0.07	7.06	17.67	0.020	0.095	0.095
SB700	72.76	0.7	0.14	7.82	18.57	0.010	0.105	0.110
LKB500	69.75	1.66	1.36	10.09	17.13	0.024	0.144	0.163
LKB700	70.9	0.78	1.52	9.18	17.61	0.011	0.130	0.151
LSB500	70.53	1.39	0.65	10.16	17.23	0.020	0.133	0.142
LSB700	71.83	0.86	0.67	8.43	18.20	0.012	0.107	0.116
KSB500	72.11	1.39	0.72	7.32	18.45	0.019	0.114	0.124
KSB700	72.75	0.58	0.82	6.46	19.38	0.008	0.105	0.116
LKSB500	70.49	1.40	0.79	9.68	17.63	0.020	0.137	0.149
LKSB700	72.47	0.73	0.93	7.28	18.59	0.010	0.101	0.113

ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบของไบโอชาร์ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 ℃ พบว่า ไบโอชาร์ที่ผลิตได้มีปริมาณคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ออกซิเจน และกำมะถันใกล้เคียงกัน โดยมีปริมาณคาร์บอนเฉลี่ยที่ 71.11 % ปริมาณไฮโดรเจนเฉลี่ยที่ 1.54 % ปริมาณไนโตรเจนเฉลี่ยที่ 0.94 % ปริมาณออกซิเจนเฉลี่ยที่ 8.88 % และปริมาณกำมะถันเฉลี่ยที่ 0.02 % จากผลการวิเคราะห์พบว่าไบโอชาร์จากเปลือกสละมีปริมาณคาร์บอนสูงที่สุดที่ร้อยละ 73.68 ± 0.05 ปริมาณธาตุองค์ประกอบของไบโอชาร์ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 ℃ พบว่า ไบโอชาร์ที่ผลิตได้มีปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ออกซิเจน และกำมะถันใกล้เคียงกัน โดยมีปริมาณคาร์บอนเฉลี่ยที่ 71.65 % ปริมาณไฮโดรเจนเฉลี่ยที่ 0.71 % ปริมาณไนโตรเจนเฉลี่ยที่ 1.06 % และปริมาณออกซิเจนเฉลี่ยที่ 8.36 % จากผลการวิเคราะห์พบว่าไบโอชาร์จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลือกสละมีปริมาณคาร์บอนสูงที่สุดที่ร้อยละ 72.76 ± 0.67 โดยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณธาตุองค์ประกอบในไบโอชาร์เกิดจากการเพิ่มขึ้นอุณหภูมิไพโรไลซิส ซึ่งจะส่งผลต่อคุณสมบัติของไบโอชาร์ ไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติความชอบน้ำของไบโอชาร์ ความมีขั้วของไบโอชาร์ โดยวิเคราะห์ได้จากอัตราส่วนอะตอมของปริมาณธาตุองค์ประกอบในไบโอชาร์ ผลการวิเคราะห์พบว่าอัตราส่วนอะตอมของออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) ของไบโอชาร์ที่ผลิตที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C มีค่าน้อยกว่าไบโอชาร์ที่ผลิตที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C อัตราส่วนอะตอมไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C) ที่ลดลงโดยส่วนใหญ่ และอัตราส่วนอะตอมของออกซิเจนและไนโตรเจนต่อคาร์บอน ((O+N)/C) โดยส่วนใหญ่มีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิไพโรไลซิสเพิ่มขึ้น [40]

การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิไพโรไลซิสส่งผลต่อปริมาณธาตุองค์ประกอบของไบโอชาร์ โดยเมื่ออุณหภูมิไพโรไลซิสเพิ่มขึ้นจาก 500 เป็น 700 °C ปริมาณคาร์บอนของไบโอชาร์จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการคาร์บอไนเซชันและการสลายตัวของวัตถุดิบ ไบโอชาร์ที่ผลิตได้จะมีปริมาณคาร์บอนสูง ในทางกลับกันปริมาณไฮโดรเจน และปริมาณออกซิเจนจะลดลง เนื่องจากเกิดการสลายตัวและการระเหยของสารประกอบระเหยง่ายในวัตถุดิบ ไฮโดรเจนและออกซิเจนในวัตถุดิบจะถูกผลักออก ทำให้มีปริมาณน้อยลง และปริมาณไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้นเป็นผลจากปฏิกิริยาการกักเก็บไนโตรเจนที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิไพโรไลซิสสูงกว่า ทำให้ปริมาณไนโตรเจนเพิ่มขึ้น สำหรับอัตราส่วนอะตอมของปริมาณธาตุองค์ประกอบในไบโอชาร์ ไบโอชาร์มีอัตราส่วนอะตอมของออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) ของไบโอชาร์ที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิไพโรไลซิสเพิ่มขึ้น แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนของไบโอชาร์ลดลงเมื่ออุณหภูมิไพโรไลซิสเพิ่มขึ้น ทำให้ไบโอชาร์มีคุณสมบัติความชอบน้ำน้อยลง อัตราส่วนอะตอมไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C) ที่ลดลงโดยส่วนใหญ่ แสดงถึงคุณสมบัติความเป็นสารประกอบอะโรมาติกที่ลดลง และอัตราส่วนอะตอมของออกซิเจนและไนโตรเจนต่อคาร์บอน แสดงถึงคุณสมบัติความมีขั้วทางไฟฟ้าของไบโอชาร์ที่ลดลงโดยส่วนใหญ่เมื่ออุณหภูมิไพโรไลซิสเพิ่มขึ้น [41]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์

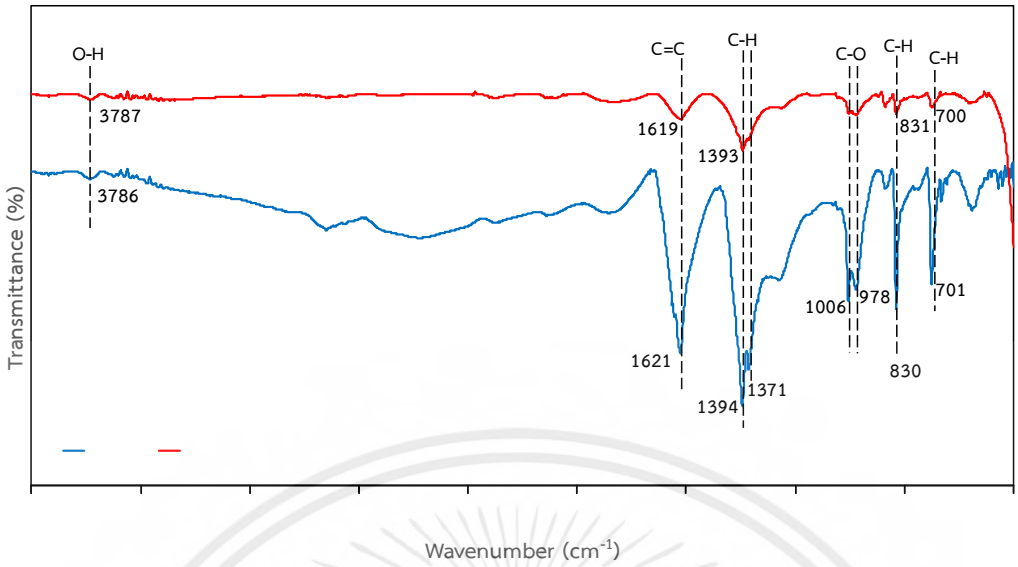
4.4.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกมะนาว ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C และ 700 °C

ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของไบโอชาร์จากเปลือกมะนาวที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C และ 700 °C พบว่าไบโอชาร์แสดงหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญของลิกโนเซลลูโลสบนพื้นผิว ได้แก่ พีค O-H Stretching ที่ 3786-3787 cm^{-1} อยู่ในหมู่ฟังก์ชันในกลุ่มหมู่ไฮดรอกซิล พีค C=C Stretching ที่ 1621-1619 cm^{-1}, พีค C-H Bending ที่ 1394-1371 cm^{-1}, 830-831 cm^{-1} และ 700-701 cm^{-1} อยู่ในหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบอะโรมาติก และพีค C-O Stretching ที่ 1006-978 cm^{-1} อยู่ในหมู่ฟังก์ชันในกลุ่มกรดคาร์บอกซิลิกและเอสเทอร์ และเมื่อพิจารณาระดับการดูดกลืนแสงที่เกิดขึ้นในแต่ละพีคพบว่า ในไบโอชาร์ที่ผลิตด้วยอุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C พีค O-H, พีค C=C, พีค C-H และ พีค C-O มีระดับการดูดกลืนแสงที่สูงกว่าไบโอชาร์ที่ผลิตด้วยอุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C แสดงให้เห็นถึงการสูญเสียหมู่ฟังก์ชันหรืออนุภาคที่ประกอบด้วยไฮโดรเจนและออกซิเจนในไบโอชาร์ที่ผลิตด้วยอุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกมะนาว ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C และ 700 °C

Bonded	Type of Vibration	Functional Group	Wavenumber (cm^{-1})		Ref.
			LB500	LB700	
O-H	stretching	Hydroxyl	3786	3787	[14]
C=C	Stretching	Aromatic	1621	1619	[42]
C-H	Bending	Aromatic	1394, 1371	1393	[43]
C-O	Stretching	Carboxylic acids, Esters	1006, 978	978	[42]
C-H	Bending	Aromatic	830	831	[1]
C-H	Bending	Aromatic	701	700	[44]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของไบโอชาร์จากเปลือกมะนาวที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C และ 700 °C

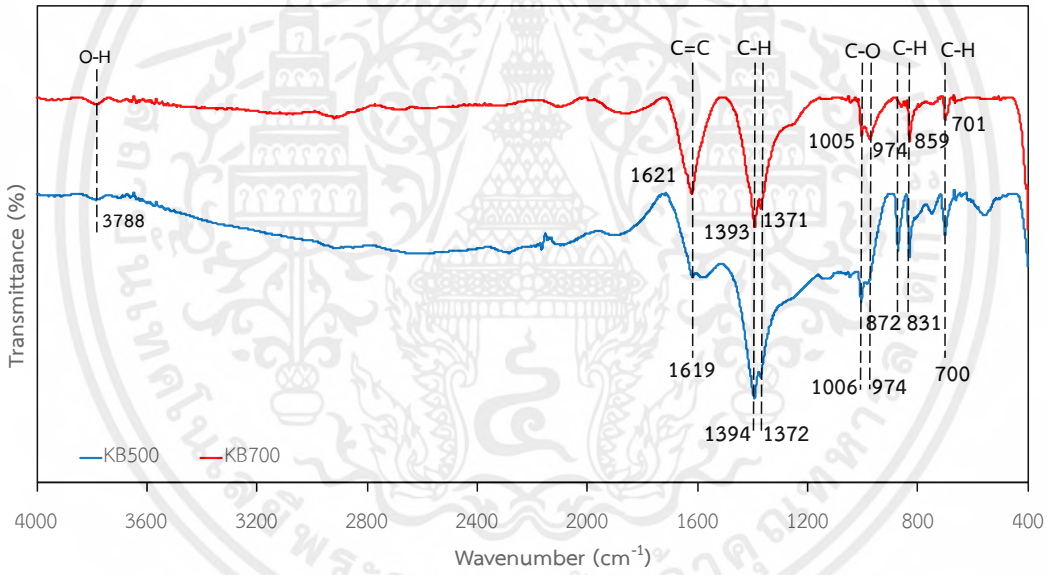
4.4.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกส้มจี๊ด ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C และ 700 °C

ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของไบโอชาร์จากเปลือกสละ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C และ 700 °C พบว่าไบโอชาร์แสดงหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญของลิกโนเซลลูโลสบนพื้นผิว ได้แก่ พีค O-H Stretching ที่ 3788 cm^{-1} อยู่ในหมู่ฟังก์ชันในกลุ่มหมู่ไฮดรอกซิล พีค C=C Stretching ที่ 1584-1563 cm^{-1} อยู่ในหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบอะโรมาติก พีค C-H Bending ที่ 1393-1372 cm^{-1}, และ 867-823 cm^{-1} อยู่ในหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบอะโรมาติก พีค C-O Stretching ที่ 1120 cm^{-1} อยู่ในหมู่ฟังก์ชันในกลุ่มกรดคาร์บอกซิลิก และพีค C-O Stretching ที่ 1005-974 cm^{-1} อยู่ในหมู่ฟังก์ชันในกลุ่มกรดคาร์บอกซิลิกและเอสเทอร์ และเมื่อพิจารณาระดับการดูดกลืนแสงที่เกิดขึ้นในแต่ละพีคพบว่า ในไบโอชาร์ที่ผลิตด้วยอุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C พีค O-H, พีค C=C, พีค C-H และ พีค C-O มีระดับการดูดกลืนแสงที่สูงกว่าไบโอชาร์ที่ผลิตด้วยอุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C แสดงให้เห็นถึงการสูญเสียหมู่ฟังก์ชันหรืออนุภาคที่ประกอบด้วยไฮโดรเจนและออกซิเจนในไบโอชาร์ที่ผลิตด้วยอุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกส้มจี๊ด ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C และ 700 °C

Bonded	Type of Vibration	Functional Group	Wavenumber (cm^{-1})		Ref.
			KB500	KB700	
O-H	stretching	Hydroxyl	3788	3788	[14]
C=C	Stretching	Aromatic	1619	1621	[42]
C-H	Bending	Aromatic	1394, 1371	1393, 1371	[43]
C-O	Stretching	Carboxylic acids, Esters	1006	1005, 974	[42]
C-H	Bending	Aromatic	872, 831	859	[1]
C-H	Bending	Aromatic	701	700	[44]



รูปที่ 4.2 หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของไบโอชาร์จากเปลือกส้มจี๊ดที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C และ 700 °C

4.4.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกสละ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C และ 700 °C

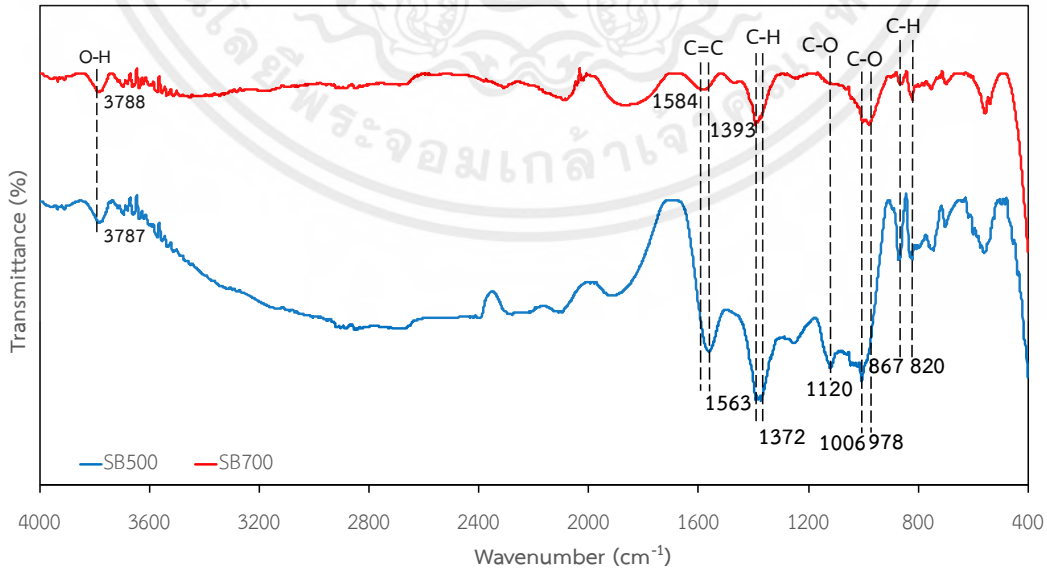
ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของไบโอชาร์จากเปลือกมะนาว - ส้มจี๊ด ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C และ 700 °C พบว่าไบโอชาร์แสดงหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญของลิกโนเซลลูโลสบนพื้นผิว ได้แก่ พีค O-H Stretching ที่ 3787-3788 cm^{-1} อยู่ในหมู่ฟังก์ชันในกลุ่มหมู่ไฮดรอกซิล พีค C=C Stretching ที่ 1621 cm^{-1}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อยู่ในหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบอะโรมาติก พีค C-H Bending ที่ 1394-1371 cm^{-1}, 835-831 cm^{-1}, และ 701-764 cm^{-1} อยู่ในหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบอะโรมาติก และพีค C-O Stretching ที่ 1006-977 cm^{-1} อยู่ในหมู่ฟังก์ชันในกลุ่มกรดคาร์บอกซิลิกและเอสเทอร์ และเมื่อพิจารณาระดับการดูดกลืนแสงที่เกิดขึ้นในแต่ละพีคพบว่า ในไบโอชาร์ที่ผลิตด้วยอุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C พีค O-H, พีค C=C, พีค C-H และ พีค C-O มีระดับการดูดกลืนแสงที่สูงกว่าไบโอชาร์ที่ผลิตด้วยอุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C แสดงให้เห็นถึงการสูญเสียหมู่ฟังก์ชันหรืออนุภาคที่ประกอบด้วยไฮโดรเจนและออกซิเจนในไบโอชาร์ที่ผลิตด้วยอุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C

ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกสละ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C และ 700 °C

Bonded	Type of Vibration	Functional Group	Wavenumber (cm^{-1})		Ref.
			SB500	SB700	
O-H	stretching	Hydroxyl	3787	3788	[14]
C=C	Stretching	Aromatic	1563	1584	[42]
C-H	Bending	Aromatic	1372	1393	[43]
C-O	Stretching	Carboxylic acids	1120	-	[44]
C-O	Stretching	Carboxylic acids, Esters	1006, 978	978	[42]
C-H	Bending	Aromatic	867, 821	820	[1]



รูปที่ 4.3 หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของไบโอชาร์จากเปลือกสละที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C และ 700 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

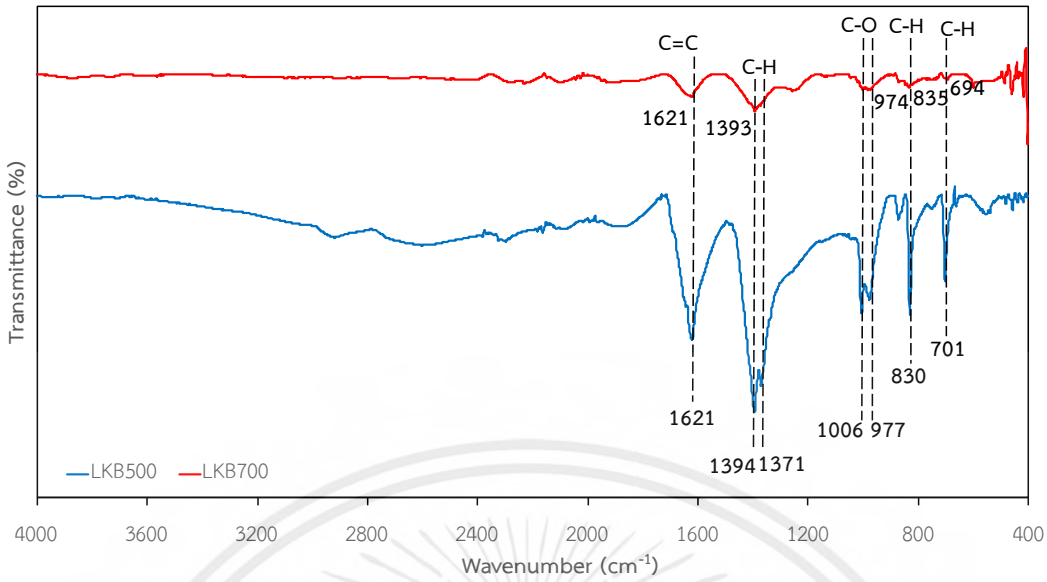
4.4.4 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกมะนาว – ส้มจี๊ด ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C และ 700 °C

ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของไบโอชาร์จากเปลือกมะนาว – สละ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C และ 700 °C พบว่าไบโอชาร์แสดงหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญของลิกโนเซลลูโลสบนพื้นผิว ได้แก่ พีค C=C Stretching ที่ 1621-1620 cm^{-1} อยู่ในหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบอะโรมาติก พีค C-H Bending ที่ 1393-1371 cm^{-1}, 830 cm^{-1}, และ 699-698 cm^{-1} อยู่ในหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบอะโรมาติก และพีค C-O Stretching ที่ 1005-975 cm^{-1} อยู่ในหมู่ฟังก์ชันในกลุ่มกรดคาร์บอกซิลิกและเอสเทอร์ นอกจากนี้ไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกมะนาว – สละ มีหมู่ฟังก์ชันที่ไม่ได้แตกต่างจากไบโอชาร์จากเปลือกมะนาวและไบโอชาร์จากเปลือกสละมากนัก โดยยังมีหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวที่เหมือนกัน โดยจะเห็นว่าลักษณะของพีค C=C และพีค C-O มีความแข็งแรงเหมือนกับไชโอชาร์จากเปลือกสละ และมีพีค C-H ที่มีความแข็งแรงเหมือนกับไบโอชาร์จากเปลือกมะนาว

ตารางที่ 4.7 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกมะนาว – ส้มจี๊ด ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C และ 700 °C

Bonded	Type of Vibration	Functional Group	Wavenumber (cm^{-1})		Ref.
			LKB500	LKB700	
C=C	stretching	Aromatic	1621	1621	[42]
C-H	bending	Aromatic	1394, 1371	1393	[43]
C-O	stretching	Carboxylic acids, Esters	1006, 977	974	[42]
C-H	bending	Aromatic	830	835	[1]
C-H	bending	Aromatic	701	694	[44]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของไบโอชาร์จากเปลือกมะนาว-ส้มจี๊ดที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C และ 700 °C

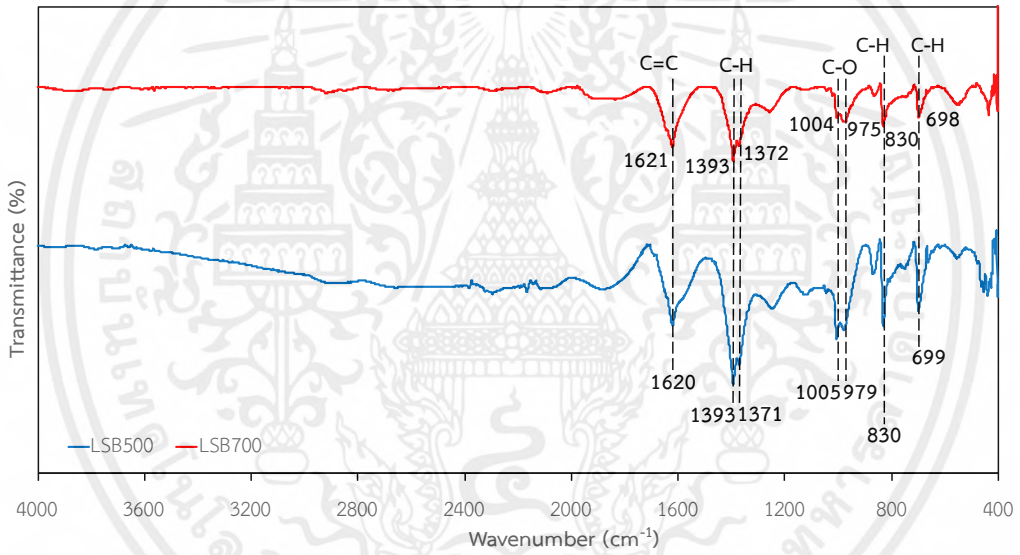
4.4.5 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกมะนาว – สละ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C และ 700 °C

ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของไบโอชาร์จากเปลือกส้มจี๊ด-สละที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C และ 700 °C พบว่าไบโอชาร์แสดงหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญของลิกโนเซลลูโลสบนพื้นผิว ได้แก่ พีค C=C Stretching ที่ 1621-1567 cm^{-1} อยู่ในหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบอะโรมาติก พีค C-H Bending ที่ 1393-1372 cm^{-1}, 872-830 cm^{-1}, และ 699 cm^{-1} อยู่ในหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบอะโรมาติก พีค C-O Stretching ที่ 1119 cm^{-1} อยู่ในหมู่ฟังก์ชันในกลุ่มกรดคาร์บอกซิลิก และพีค C-O Stretching ที่ 1006-974 cm^{-1} อยู่ในหมู่ฟังก์ชันในกลุ่มกรดคาร์บอกซิลิกและเอสเทอร์ และเมื่อพิจารณาระดับการดูดกลืนแสงที่เกิดขึ้นในแต่ละพีคพบว่า ในไบโอชาร์ที่ผลิตด้วยอุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C พีค C=C, พีค C-H และ พีค C-O มีระดับการดูดกลืนแสงที่สูงกว่าไบโอชาร์ที่ผลิตด้วยอุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C แสดงให้เห็นถึงการสูญเสียหมู่ฟังก์ชันหรืออนุภาคที่ประกอบด้วยไฮโดรเจนและออกซิเจนในไบโอชาร์ที่ผลิตด้วยอุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกมะนาว – สละ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C และ 700 °C

Bonded	Type of Vibration	Functional Group	Wavenumber (cm^{-1})		Ref.
			LSB500	LSB700	
C=C	stretching	Aromatic	1620	1621	[42]
C-H	bending	Aromatic	1393, 1371	1393, 1371	[43]
C-O	stretching	Carboxylic acids, Esters	1005, 979	1004, 975	[42]
C-H	bending	Aromatic	830	830	[1]
C-H	bending	Aromatic	699	698	[44]



รูปที่ 4.5 หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของไบโอชาร์จากเปลือกมะนาว-สละที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C และ 700 °C

4.4.6 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกส้มจี๊ด – สละ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C และ 700 °C

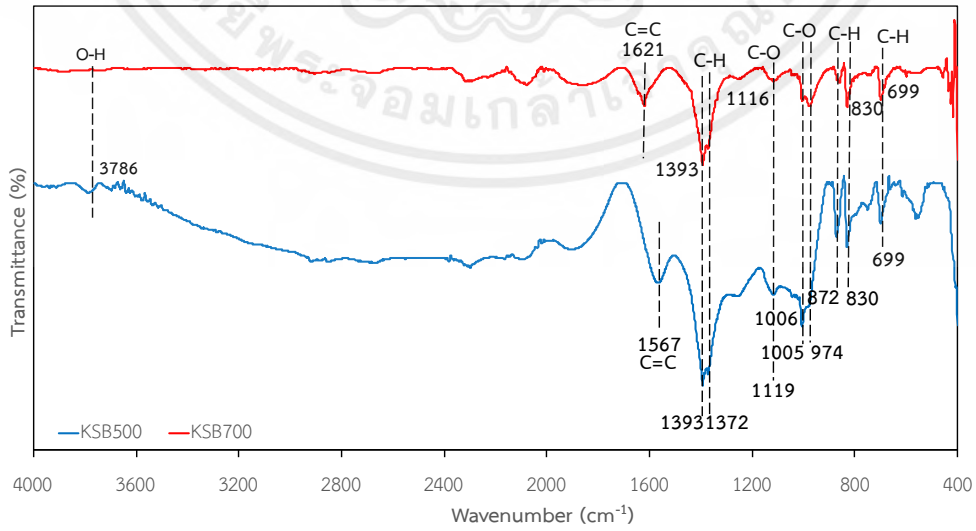
ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของไบโอชาร์จากเปลือกส้มจี๊ด-สละที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C และ 700 °C พบว่าไบโอชาร์แสดงหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญของลิกโนเซลลูโลสบนพื้นผิว ได้แก่ พีค O-H Stretching ที่ 3786 cm^{-1} อยู่ในหมู่ฟังก์ชันในกลุ่มหมู่ไฮดรอกซิล พีค C=C Stretching ที่ 1621-1567 cm-1 อยู่ในหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบอะโรมาติก พีค C-H Bending ที่ 1393-1372 cm-1, 872-830 cm-1, และ 699

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

cm-1 อยู่ในหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบอะโรมาติก พีค C-O Stretching ที่ 1119 cm-1 อยู่ในหมู่ฟังก์ชันในกลุ่มกรดคาร์บอกซิลิก และพีค C-O Stretching ที่ 1006-974 cm-1 อยู่ในหมู่ฟังก์ชันในกลุ่มกรดคาร์บอกซิลิกและเอสเทอร์ และเมื่อพิจารณาระดับการดูดกลืนแสงที่เกิดขึ้นในแต่ละพีคพบว่า ในไบโอชาร์ที่ผลิตด้วยอุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C พีค O-H, พีค C=C, พีค C-H และ พีค C-O มีระดับการดูดกลืนแสงที่สูงกว่าไบโอชาร์ที่ผลิตด้วยอุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C แสดงให้เห็นถึงการสูญเสียหมู่ฟังก์ชันหรืออนุภาคที่ประกอบด้วยไฮโดรเจนและออกซิเจนในไบโอชาร์ที่ผลิตด้วยอุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C

ตารางที่ 4.9 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกส้มจี๊ด – สละ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C และ 700 °C

Bonded	Type of Vibration	Functional Group	Wavenumber (cm^{-1})		Ref.
			KSB500	KSB700	
O-H	stretching	Hydroxyl	3786	-	[14]
C=C	stretching	Aromatic	1567	1621	[42]
C-H	bending	Aromatic	1393, 1372	1393	[43]
C-O	stretching	Carboxylic acids	1119	1116	[44]
C-O	stretching	Carboxylic acids, Esters	1006	1005, 974	[42]
C-H	bending	Aromatic	872, 830	859, 830	[1]
C-H	bending	Aromatic	699	699	[44]



รูปที่ 4.6 หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของไบโอชาร์จากเปลือกส้มจี๊ด-สละที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C และ 700 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

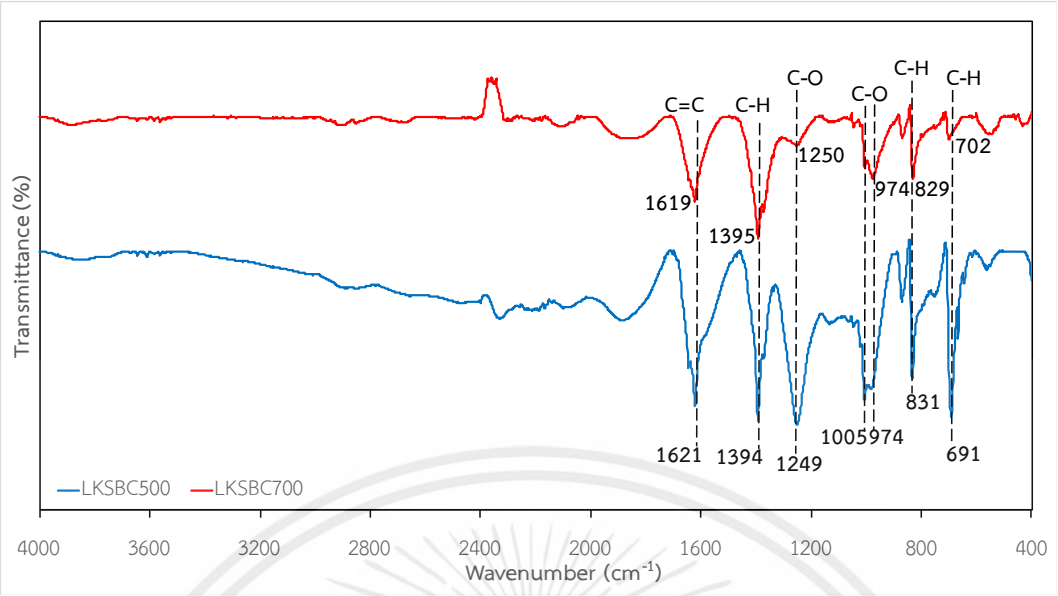
4.4.7 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกมะนาว – ส้มจี๊ด – สละ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C และ 700 °C

ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของไบโอชาร์จากเปลือกมะนาว-ส้มจี๊ด-สละที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C และ 700 °C พบว่าไบโอชาร์แสดงหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญของลิกโนเซลลูโลสบนพื้นผิว ได้แก่ พีค C=C Stretching ที่ 1621-1619 cm^{-1} อยู่ในหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบอะโรมาติก พีค C-H Bending ที่ 1395-1394 cm^{-1}, 831-829 cm^{-1}, และ 702-691 cm^{-1} อยู่ในหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบอะโรมาติก พีค C-O Stretching ที่ 1250-1249 cm^{-1} อยู่ในหมู่ฟังก์ชันในกลุ่มฟีนอล อีเทอร์ และกรดคาร์บอกซิลิก และพีค C-O Stretching ที่ 1006-974 cm^{-1} อยู่ในหมู่ฟังก์ชันในกลุ่มกรดคาร์บอกซิลิกและเอสเทอร์ และเมื่อพิจารณาระดับการดูดกลืนแสงที่เกิดขึ้นในแต่ละพีคพบว่า ในไบโอชาร์ที่ผลิตด้วยอุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C พีค C=C, พีค C-H และ พีค C-O มีระดับการดูดกลืนแสงที่สูงกว่าไบโอชาร์ที่ผลิตด้วยอุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C แสดงให้เห็นถึงการสูญเสียหมู่ฟังก์ชันหรืออนุภาคที่ประกอบด้วยไฮโดรเจนและออกซิเจนในไบโอชาร์ที่ผลิตด้วยอุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C

ตารางที่ 4.10 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกมะนาว – ส้มจี๊ด – สละ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C และ 700 °C

Bonded	Type of Vibration	Functional Group	Wavenumber (cm^{-1})		Ref.
			LKSB500	LKSB700	
C=C	stretching	Aromatic	1621	1619	[42]
C-H	bending	Aromatic	1394	1395	[43]
C-O	stretching	Phenols, Ethers, Carboxylic acids	1249	1250	[1]
C-O	stretching	Carboxylic acids, Esters	1005	974	[42]
C-H	bending	Aromatic	831	829	[1]
C-H	bending	Aromatic	691	702	[44]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของไบโอชาร์จากเปลือกมะนาว–ส้มจี๊ด–สละ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C และ 700 °C

ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C และ 700 °C มีความแตกต่างกัน ทำให้เห็นว่าอุณหภูมิไพโรไลซิสมีอิทธิพลต่อการมีอยู่ของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวไบโอชาร์ โดยเมื่อพิจารณาระดับค่าการดูดกลืนแสงพบว่า ไบโอชาร์ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C มีพีคที่มีความแข็งแรงสูงกว่า ซึ่งบ่งบอกถึงการมีความหนาแน่นของหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนและไฮโดรเจนสูงกว่าเมื่อเทียบกับไบโอชาร์ที่ไพโรไลซิสที่อุณหภูมิสูงกว่า หมู่ฟังก์ชันเหล่านี้อาจรวมถึงหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) และหมู่คาร์บอกซิล (-COOH) จากชีวมวลที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอชาร์ นอกจากนี้หมู่ฟังก์ชันเหล่านี้ยังอาจส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับของไบโอชาร์ ในส่วนของไบโอชาร์ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C มีการสลายตัวด้วยความร้อนและการระเหยของหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนและไฮโดรเจนมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการลดลงของความหนาแน่นของกลุ่มไฮดรอกซิลและคาร์บอกซิลบนพื้นผิวของไบโอชาร์ อุณหภูมิไพโรไลซิสที่สูงขึ้นทำให้ไบโอชาร์มีการก่อตัวของโครงสร้างอะโรมาติกในไบโอชาร์มากขึ้น [41, 44]

4.5 ผลการวิเคราะห์ค่า pH ของไบโอชาร์

ผลการวิเคราะห์ค่า pH ของถ่านไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกแต่ละชนิดที่อุณหภูมิ 500 °C และ 700 °C พบว่าไบโอชาร์ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C มีค่า pH ต่ำกว่าไบโอชาร์อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C โดยค่า pH ของไบโอชาร์ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C ค่า pH มากสุดเป็น LSB มีค่า pH เท่ากับ 8.90 ± 0.04 และค่า pH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่ำสุดเป็น LB มีค่า pH เท่ากับ 7.72 ± 0.04 และค่า pH ของไบโอชาร์ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C ค่า pH มากสุดเป็น SB มีค่า pH เท่ากับ 9.31 ± 0.05 และค่า pH ต่ำสุดเป็น LKSB มีค่า pH เท่ากับ 7.70 ± 0.02

ตารางที่ 4.11 ค่า pH ของของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกแต่ละชนิดที่อุณหภูมิ 500 °C และ 700 °C

Sample	pH	
	500 °C	700 °C
LB	7.72 ± 0.04	8.48 ± 0.14
KB	7.97 ± 0.12	8.17 ± 0.05
SB	8.71 ± 0.08	9.31 ± 0.05
LKB	7.79 ± 0.06	8.06 ± 0.03
LSB	8.90 ± 0.04	9.03 ± 0.02
KSB	8.49 ± 0.13	8.76 ± 0.03
LKSB	7.90 ± 0.03	7.70 ± 0.02

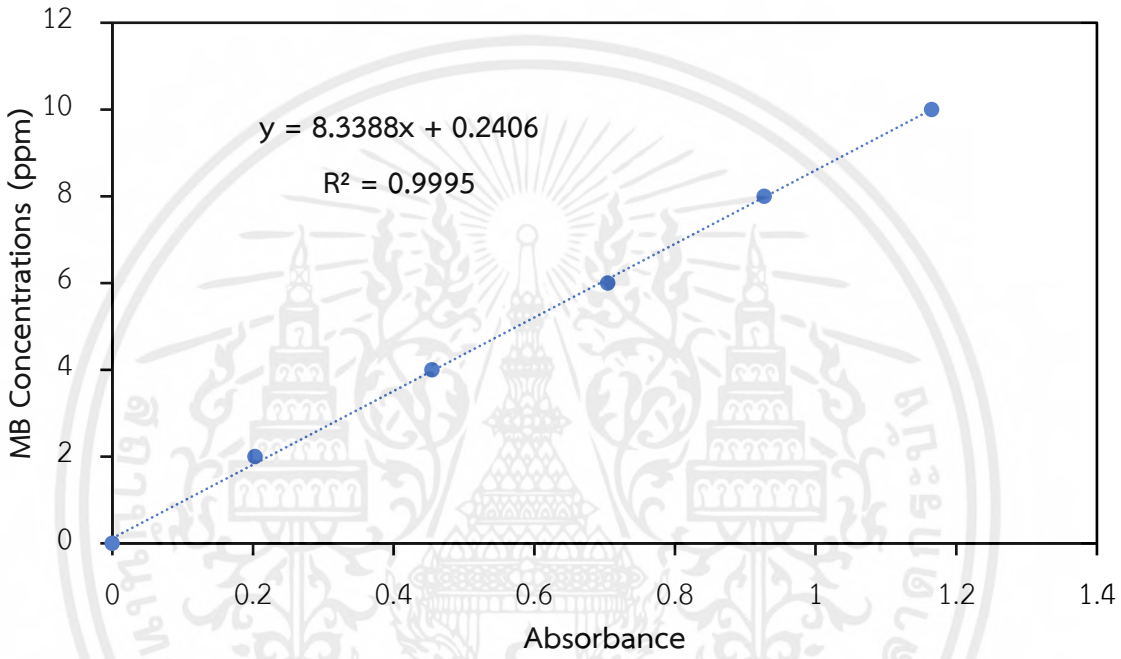
การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิไพโรไลซิสส่งผลต่อค่า pH ของไบโอชาร์ โดยเมื่ออุณหภูมิไพโรไลซิสเพิ่มขึ้นจาก 500 เป็น 700 °C จะเห็นได้ว่าค่า pH ของไบโอชาร์เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C ไบโอชาร์เกิดการสลายตัวของวัตถุดิบน้อยกว่า ไบโอชาร์ที่ผลิตได้มีความเข้มข้นของหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรด เช่น คาร์บอกซิล ไฮดรอกซิล และหมู่ฟีนอล ซึ่งส่งผลให้ไบโอชาร์มีค่า pH ต่ำ ในทางกลับกันไบโอชาร์ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C เกิดการสลายตัวของวัตถุดิบมากกว่า ไบโอชาร์ที่ผลิตได้มีความเข้มข้นของหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรดน้อยกว่า ส่งผลให้ไบโอชาร์มีค่า pH สูงขึ้น [45]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 2 ผลการวิเคราะห์การดูดซับเมทิลีนบลูด้วยโอชาร์ประเภทต่าง ๆ

4.6 การสร้างกราฟมาตรฐานค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลีนบลูมาตรฐาน

จากการนำสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 2, 4, 6, 8 และ 10 ppm ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 620 nm ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ พบว่าความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของเมทิลีนบลู สอดคล้องกับสมการเส้นตรง สอดคล้องกับสมการเส้นตรง y = 8.3388x + 0.2406 และมีค่าสัมประสิทธิสหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.9995



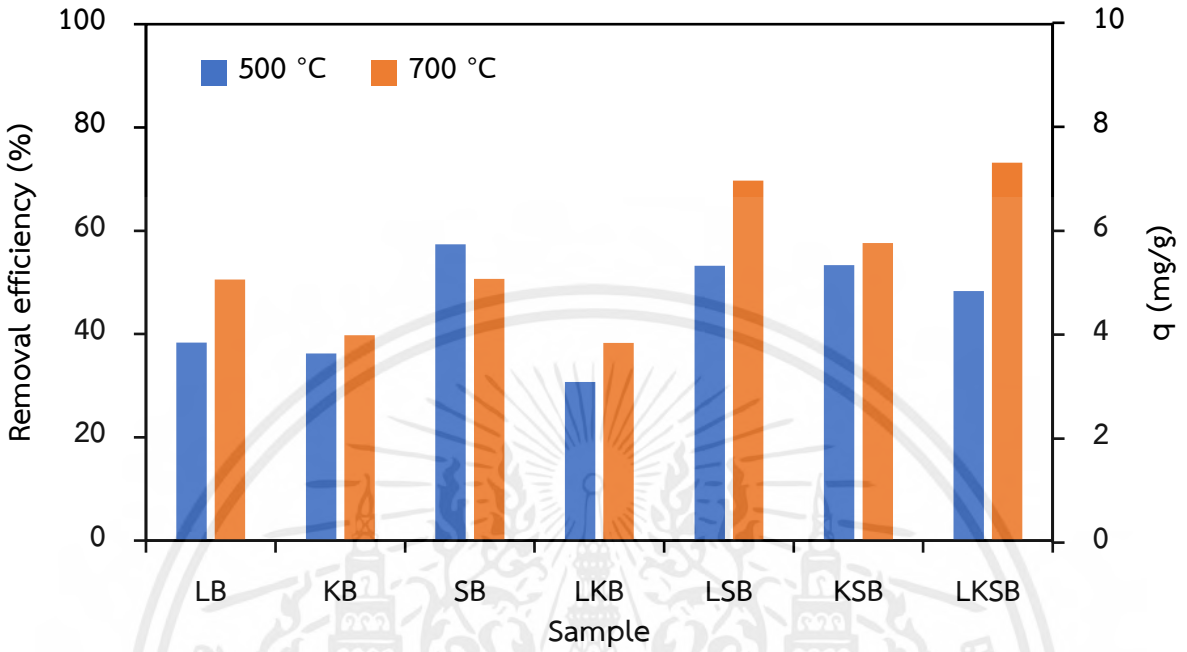
รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นต่าง ๆ ของสารละลายเมทิลีนบลูที่ความยาวคลื่น 620 nm

4.7 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการดูดซับเมทิลีนบลู และความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู

ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการดูดซับเมทิลีนบลู พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับเมทิลีนบลูของไบโอชาร์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งจากรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าไบโอชาร์ที่ผลิตที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C มีประสิทธิภาพในการดูดซับที่สูงกว่าไบโอชาร์ที่ผลิตที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการดูดซับยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น ๆ ไม่ว่าจะเป็นชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตไบโอชาร์และคุณสมบัติของไบโอชาร์แต่ละชนิด โดยจะเห็นว่าไบโอชาร์ที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุงเป็นไบโอชาร์ที่ผลิตจากเปลือกมะนาว - ส้มจี๊ด - สละ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C โดยมีประสิทธิภาพการดูดซับที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

73.18% อันดับรองลงมาจะเป็นไบโอชาร์ที่ผลิตจากเปลือกมะนาว - สละ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C โดยมีประสิทธิภาพในการดูดซับอยู่ที่ 69.73%



รูปที่ 4.9 ค่าประสิทธิภาพการดูดซับและความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูของไบโอชาร์แต่ละประเภท

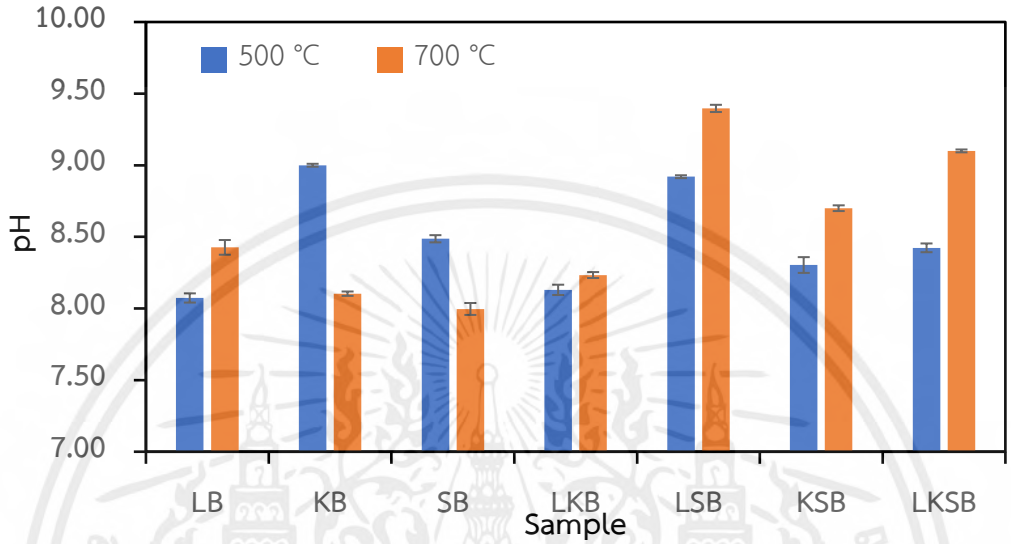
การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิไพโรไลซิสและชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตไบโอชาร์ ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับเมทิลีนบลูอย่างมีนัยยะสำคัญ โดยทั่วไปแล้วไบโอชาร์ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรรูพรุนสูง จะมีความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูที่สูงตามไปด้วย ซึ่งจะเห็นได้ว่าไบโอชาร์ที่ผลิตที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C จะมีค่าพื้นที่ผิวรูพรุน และปริมาตรรูพรุนสูง ทำให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับเมทิลีนบลูที่สูงกว่านั่นเอง อย่างไรก็ตามยังมีปัจจัยอื่นที่ส่งผลต่อความสามารถและประสิทธิภาพในการดูดซับ ไม่ว่าจะเป็นหมู่ฟังก์ชันบนพื้นที่ผิวรูพรุนที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับของไบโอชาร์อย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน ทำให้ไบโอชาร์บางชนิดมีความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูสูง แม้จะมีพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนน้อยกว่า [46]

4.8 ผลการวิเคราะห์ค่า pH หลังการดูดซับเมทิลีนบลู

ผลการวิเคราะห์ pH หลังการดูดซับเมทิลีนบลู พบว่าสารละลายเมทิลีนบลูมีค่า pH เท่ากับ 6 เมื่อผ่านการดูดซับด้วยไบโอชาร์แล้ว จะเห็นได้ว่าค่า pH ของสารละลายเมทิลีนบลูเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยยะสำคัญ โดยมีค่า pH ของสารละลายเมทิลีนบลูจะเพิ่มขึ้นมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ คุณสมบัติของไบโอชาร์แต่ละชนิดโดยส่วนใหญ่แล้วค่า pH ของสารละลายเมทิลีนบลูจะเพิ่มขึ้นสูงมาก เมื่อผ่านการดูดซับด้วยไบโอชาร์ที่ผลิตด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

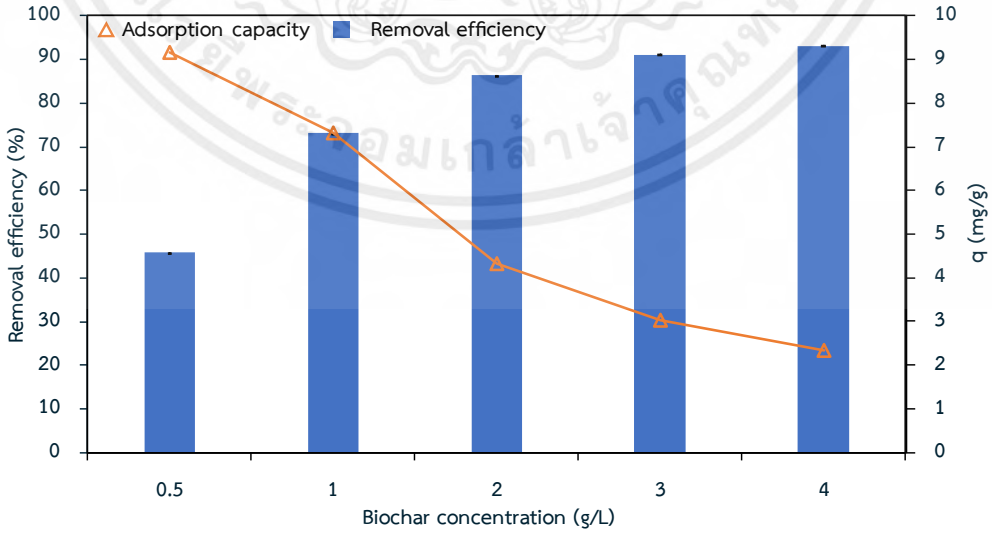
อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C โดยค่า pH สูงสุดของสารละลายเมทิลีนบลูหลังการดูดซับอยู่ที่ 9.40 ซึ่งเป็นการดูดซับด้วยไบโอชาร์ที่ผลิตจากเปลือกมะนาว – สละ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C และค่า pH ต่ำสุดของสารละลายเมทิลีนบลูหลังจากดูดซับอยู่ที่ 8.00 ซึ่งเป็นการดูดซับด้วยไบโอชาร์ที่ผลิตจากเปลือกสละ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C



รูปที่ 4.10 ค่า pH หลังทำการดูดซับเมทิลีนบลูของไบโอชารแต่ละประเภท

4.9 ผลการวิเคราะห์ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นของไบโอชาร์ที่แตกต่างกัน

4.9.1 การวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพการดูดซับเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นของไบโอชาร์ต่างกัน

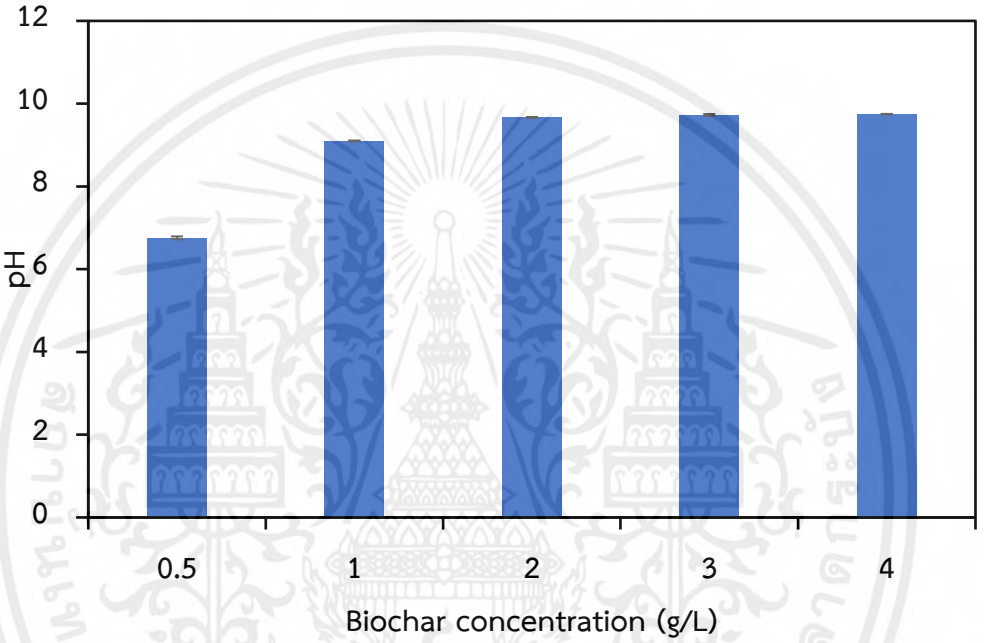


รูปที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพการดูดซับและความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นของไบโอชาร์แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพการดูดซับเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นของไบโอชาร์ต่างกัน พบว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มข้นของไบโอชาร์ จะเห็นได้ว่าค่าประสิทธิภาพการดูดซับเมทิลีนบลูมีการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่าประสิทธิภาพการดูดซับจะมีการเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของไบโอชาร์เพิ่มขึ้น และค่าประสิทธิภาพการดูดซับเมทิลีนบลูที่สูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 93.05 ± 0.01 ที่ความเข้มข้นของไบโอชาร์ 4 g/L

4.9.2 การวิเคราะห์ค่า pH หลังการดูดซับเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นของไบโอชาร์ต่างกัน



รูปที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์ค่า pH ของสารละลายเมทิลีนบลูหลังการดูดซับที่ปริมาณไบโอชาร์ต่างๆ

การวิเคราะห์ค่า pH หลังการดูดซับเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นของไบโอชาร์ต่างกัน พบว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความเข้มข้นของไบโอชาร์ จะเห็นได้ว่าค่า pH ของไบโอชาร์หลังการดูดซับเมทิลีนบลูมีการเปลี่ยนแปลง โดยเมื่อค่าปริมาณความเข้มข้นของไบโอชาร์เพิ่มขึ้นจนถึงปริมาณหนึ่ง จะทำให้เกิดการอิ่มตัวของค่า pH หลังการดูดซับของเมทิลีนบลู ซึ่งค่า pH หลังการดูดซับเมทิลีนบลูสูงสุดอยู่ที่ 9.75 ± 0.01 ที่ความเข้มข้นของไบโอชาร์ 4 g/L

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

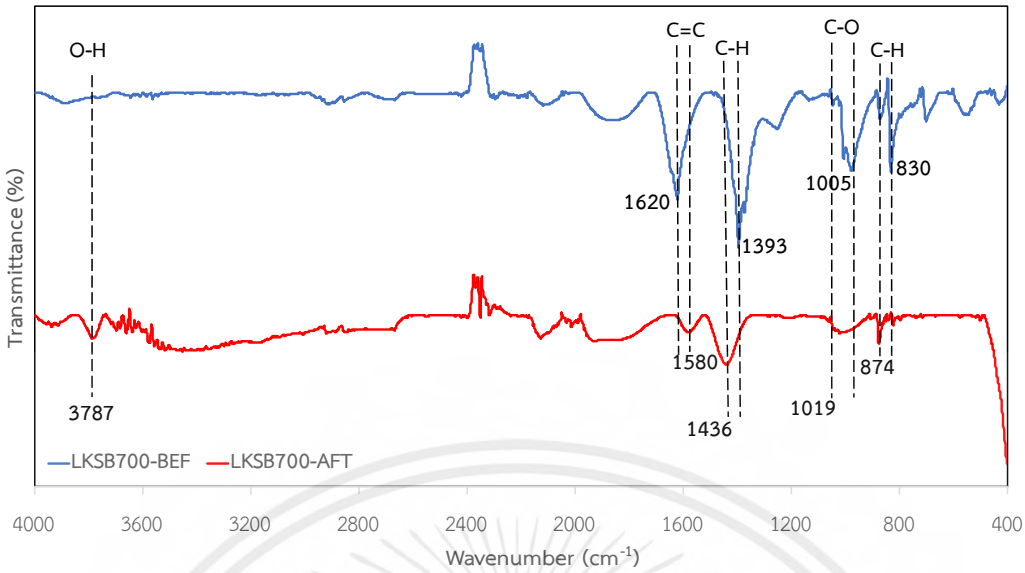
4.9.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์หลังการดูดซับเมทิลีนบลูจากไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกมะนาว – ส้มจี๊ด –สละ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C

ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของไบโอชาร์หลังการดูดซับเมทิลีนบลูจากเปลือกมะนาว-ส้มจี๊ด-สละที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C พบว่าไบโอชาร์ที่ผ่านการดูดซับแล้วแสดงหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญ ได้แก่ พีค O-H Stretching ที่ 3787 cm^{-1} อยู่ในหมู่ฟังก์ชันของหมู่ไฮดรอกซิล พีค C-H ที่ 2916 cm^{-1} อยู่ในหมู่ฟังก์ชันในกลุ่มของสารประกอบอะลิฟาติก พีค C=C Stretching ที่ 1620-1580 cm^{-1} อยู่ในหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบอะโรมาติก พีค C-H Bending ที่ 1436-1393 cm^{-1}, พีค C-O Stretching ที่ 1019-1005 cm^{-1} อยู่ในหมู่ฟังก์ชันในกลุ่มกรดคาร์บอกซิลิกและเอสเทอร์ และพีค C-H Bending 831-829 cm^{-1} อยู่ในหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบอะโรมาติก และเมื่อพิจารณาระดับการดูดกลืนแสงที่เกิดขึ้นในแต่ละพีคพบว่า ในไบโอชาร์หลังการดูดซับเมทิลีนบลูจากเปลือกมะนาว-ส้มจี๊ด-สละที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C เกิดความอ่อนตัวลงของพีค C=C, พีค C-H และ พีค C-O ซึ่งจะเห็นว่ามีระดับค่าการดูดกลืนแสงที่สูงกว่าไบโอชาร์ก่อนการดูดซับเมทิลีนบลู และเกิดพีค O-H ที่มีความแข็งแรง ซึ่งมีระดับค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลง แสดงให้เห็นถึงการการทำงานของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวไบโอชาร์ และการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างพื้นผิวไบโอชาร์กับสารละลายเมทิลีนบลู

ตารางที่ 4.12 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์หลังการดูดซับเมทิลีนบลูจากไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกมะนาว – ส้มจี๊ด –สละ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C

Bonded	Type of Vibration	Functional Group	Wavenumber (cm^{-1})		Ref.
			LKSB700-BEF	LKSB700-AFT	
O-H	stretching	Hydroxyl	-	3787	[14]
C=C	stretching	Aromatic	1621	1580	[42]
C-H	bending	Aromatic	1393	1436	[43]
C-O	stretching	Carboxylic acids, Esters	1005	1019	[42]
C-H	bending	Aromatic	830	874	[1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของไบโอชาร์หลังการดูดซับเมทิลีนบลูของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกมะนาว – ส้มจี๊ด –สละ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C

ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของไบโอชาร์หลังการดูดซับเมทิลีนบลูของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกมะนาว-ส้มจี๊ด-สละที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงไปจากไบโอชาร์ก่อนการดูดซับอย่างชัดเจน โดยไบโอชาร์ที่ผ่านการดูดซับแล้วแสดงการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญบนพื้นผิว ได้แก่ พีค O-H ที่ 3787 cm^{-1} เป็นจุดพีคใหม่ที่เพิ่มเข้ามาหลังจากการดูดซับเมทิลีนบลู เป็นผลมาจากการก่อตัวของหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล และการมีอยู่ของพันธะไฮโดรเจนที่เกิดจากการดูดซับทางเคมีระหว่างหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลและเมทิลีนบลู การเปลี่ยนแปลงที่เห็นได้ชัดเจนอีกอย่างหนึ่งเกิดขึ้นที่พีค C=C ที่ 1580 cm^{-1} และพีคพีค C-H ที่ 1436 cm^{-1} อาจเกิดจากการทำงานของ C=C ของหมู่ฟังก์ชันในสารประกอบอะโรมาติก ส่งผลให้พีคมีความอ่อนตัวลงหลังการดูดซับเมทิลีนบลู โดยรวมแล้วไบโอชาร์ที่ผ่านการดูดซับด้วยเมทิลีนบลูแสดงให้เห็นถึงการทำงานของหมู่ฟังก์ชันที่มีไฮโดรเจนและการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสของไบโอชาร์กับสารละลายเมทิลีนบลูเป็นผลมาจากปฏิกิริยาการดูดซับทางเคมีของเมทิลีนบลู นอกจากนี้พื้นผิวของไบโอชาร์ที่มีประจุเป็นลบ มีโครงสร้างเป็นรูพรุน และมีพื้นที่ผิวขนาดใหญ่อาจส่งผลให้การดูดซับเมทิลีนบลูเพิ่มมากขึ้น [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การเปรียบเทียบอุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิสที่ส่งผลต่อสมบัติของไบโอชาร์สำหรับดูดซับเมทิลีนบลู จากการศึกษาพบว่าที่อุณหภูมิ 500 °C และ 700 °C ค่าร้อยละผลผลิตของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกสละนั้นมีค่า 36.300 และ 34.405 ตามลำดับ ซึ่งนั้นเป็นค่าที่มากที่สุดในบรรดาไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกผลไม้ประเภทอื่น ๆ ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนนั้นแสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิ 500 °C และ 700 °C พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกสละนั้นมีค่าสูงที่สุด อยู่ที่ 70.847 m2/g และ 0.027 cm3/g ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุและองค์ประกอบของไบโอชาร์ที่อุณหภูมิ 500 °C และ 700 °C พบว่า ปริมาณคาร์บอนของไบโอชาร์แต่ละประเภทจะมีค่ามากกว่า 70% เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิไพโรไลซิสส่งผลต่อปริมาณธาตุองค์ประกอบของไบโอชาร์ โดยเมื่ออุณหภูมิไพโรไลซิสเพิ่มขึ้นจาก 500 เป็น 700 °C ทำให้ปริมาณคาร์บอนของไบโอชาร์จะเพิ่มขึ้นและเมื่อนำไปทำการดูดซับเมทิลีนบลูพบว่าไบโอชาร์จากการผสมกันของเปลือกผลไม้ทั้ง 3 ประเภทที่อุณหภูมิ 700 °C นั้นมีประสิทธิภาพในการดูดซับเมทิลีนบลูได้ดีกว่าที่อุณหภูมิ 500 °C โดยมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุดอยู่ที่ 73.18% ± 0.01 และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มข้นของไบโอชาร์เพื่อใช้ในการดูดซับเมทิลีนบลูพบว่า ที่ปริมาณความเข้มข้นไบโอชาร์ 4 g/L ทำให้ไบโอชาร์มีประสิทธิภาพในการดูดซับเมทิลีนได้สูงสุดที่ 93.05 ± 0.01 ดังนั้นการใช้เปลือกผลไม้เหลือทิ้งทั้ง 3 ชนิดเป็นตัวดูดซับจึงเป็นทางเลือกใหม่ของการบำบัดน้ำเสียที่มีสีปนเปื้อนจากกระบวนการย้อมผ้า

5.2 ปัญหาที่พบในการทดลอง

5.3.1 ถ้วยที่ใช้ในการบรรจุไบโอชาร์เพื่อนำไปไพโรไลซิสมีการแตกร้าวจากการขยายตัวของแท่งเหล็กที่ใช้เป็นฐานรอง

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ควรศึกษาปัจจัยต่าง ๆ เช่น อัตราส่วนของเปลือกที่ใช้ในการผสม ระยะเวลา ที่อาจส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับเมทิลีนบลูด้วยไบโอชาร์

5.3.2 ควรศึกษาช่วงความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่หลากหลาย เพื่อให้สามารถครอบคลุมปัญหาจากเมทิลีนบลูที่เกิดขึ้นจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] Siipola, V., et al., *Effects of biomass type, carbonization process, and activation method on the properties of bio-based activated carbons.* Bioresources, 2018. **13**.

[2] CABI, *Citrus aurantiifolia (lime)*. Vol. CABI Compendium. 2022: CABI International CABI.

[3] Saleem, M. and M.T. Saeed, *Potential application of waste fruit peels (orange, yellow lemon and banana) as wide range natural antimicrobial agent.* Journal of King Saud University - Science, 2020. **32**(1): p. 805-810.

[4] Seo, J.Y., et al., *Production of biochar from crop residues and its application for biofuel production processes – An overview.* Bioresource Technology, 2022. **361**: p. 127740.

[5] Rafiq, S., et al., *Citrus peel as a source of functional ingredient: A review.* Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 2018. **17**(4): p. 351-358.

[6] Chairat, R., *Effect of Giberrellin Immersion on Chlorophyll and Caroteniod Contents, Chlorophyll Fluorescence and Quality of Lime Fruit cv. Pan during Storage at Ambient Temperature.* 2020.

[7] Suri, S., et al., *Sweet lime (Citrus limetta) peel waste drying approaches and effect on quality attributes, phytochemical and functional properties.* Food Bioscience, 2022. **48**: p. 101789.

[8] Palma, A. and S. D'Aquino, *Kumquat—Fortunella japonica*, in *Exotic Fruits*, S. Rodrigues, E. de Oliveira Silva, and E.S. de Brito, Editors. 2018, Academic Press. p. 271-278.

[9] Ismail, N.A. and M.F. Abu Bakar, *Salak—Salacca zalacca*, in *Exotic Fruits*, S. Rodrigues, E. de Oliveira Silva, and E.S. de Brito, Editors. 2018, Academic Press. p. 383-390.

[10] Arie, A.A., et al., *Activated porous carbons derived from the Indonesian snake fruit peel as anode materials for sodium ion batteries.* Materials Chemistry and Physics, 2018. **217**: p. 254-261.

[11] Sun, Y., et al., *The potential of biochar and lignin-based adsorbents for wastewater treatment: Comparison, mechanism, and application—A review.* Industrial Crops and Products, 2021. **166**: p. 113473.

[12] Dissanayake, P.D., et al., *Biochar-based adsorbents for carbon dioxide capture: A critical review.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020. **119**: p. 109582.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[13] Matsagar, B.M. and K.C.W. Wu, *Chapter 1 - Agricultural waste-derived biochar for environmental management*, in *Biochar in Agriculture for Achieving Sustainable Development Goals*, D.C.W. Tsang and Y.S. Ok, Editors. 2022, Academic Press. p. 3-13.

[14] Wang, Y., et al., *Preparation of novel biochar containing graphene from waste bamboo with high methylene blue adsorption capacity.* Diamond and Related Materials, 2022. **125**: p. 109034.

[15] Zhang, Y., et al., *Mechanisms and adsorption capacities of hydrogen peroxide modified ball milled biochar for the removal of methylene blue from aqueous solutions.* Bioresource Technology, 2021. **337**: p. 125432.

[16] Oladoye, P.O., et al., *Methylene blue dye: Toxicity and potential elimination technology from wastewater.* Results in Engineering, 2022. **16**: p. 100678.

[17] Liu, S., S. Li, and C.-T. Ho, *Dietary bioactives and essential oils of lemon and lime fruits.* Food Science and Human Wellness, 2022. **11**(4): p. 753-764.

[18] Britannica, *lime*, in *Encyclopedia Britannica*. 2022.

[19] Berry, R.E., *CITRUS FRUITS | Limes*, in *Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition (Second Edition)*, B. Caballero, Editor. 2003, Academic Press: Oxford. p. 1368-1371.

[20] Khan, M., R. Al-Yahyai, and F. Al-Said, *Introduction and overview of lime*. 2017: CABI International. 1–11.

[21] Matheyambath, A.C., P. Padmanabhan, and G. Paliyath, *Citrus Fruits*, in *Encyclopedia of Food and Health*, B. Caballero, P.M. Finglas, and F. Toldrá, Editors. 2016, Academic Press: Oxford. p. 136-140.

[22] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. ปริมาณผลผลิตมะนาวในปี *2563*. 2563; Available from: https://www.oae.go.th/view/1/%E0%B8%95%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%B2%E0%B8%87%E0%B9%81%E0%B8%AA%E0%B8%94%E0%B8%87%E0%B8%A3%E0%B8%B2%E0%B8%A2%E0%B8%A5%E0%B8%B0%E0%B9%80%E0%B8%AD%E0%B8%B5%E0%B8%A2%E0%B8%94%E0%B8%A1%E0%B8%B0%E0%B8%99%E0%B8%B2%E0%B8%A7/TH-TH.

[23] Cheong, M.W., et al., *Characterisation of calamansi (Citrus microcarpa). Part II: Volatiles, physicochemical properties and non-volatiles in the juice.* Food Chemistry, 2012. **134**(2): p. 696-703.

[24] Lim, T.K., *Citrus x microcarpa*, in *Edible Medicinal And Non-Medicinal Plants: Volume 4, Fruits*, T.K. Lim, Editor. 2012, Springer Netherlands: Dordrecht. p. 865-870.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[25] Roanisca, O. and R.G. Mahardika, *Citrus x microcarpa bunge fruit extract as antibacterial against staphylococcus aureus.* IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020. **599**(1): p. 012043.

[26] authority, P.s. *Calamansi - Major Fruit Crops Quarterly Bulletin, October-December 2022*. 2022; Available from: https://psa.gov.ph/fruits-crops-bulletin/calamansi#:~:text=Calamansi,the%20same%20period%20of%202021.

[27] Agriculture, A.D.o., *Draft import risk analysis report for fresh salacca (snake fruit) from Indonesia.* 2014.

[28] Supapvanich, S., R. Megia, and P. Ding, *16 - Salak (Salacca zalacca (Gaertner) Voss)*, in *Postharvest Biology and Technology of Tropical and Subtropical Fruits*, E.M. Yahia, Editor. 2011, Woodhead Publishing. p. 334-352e.

[29] (FAO), F.a.A.O.o.t.U.N., *FAOSTAT database: Production data for snake fruit in Indonesia*. 2019.

[30] Enaime, G., et al. *Biochar for Wastewater Treatment—Conversion Technologies and Applications*. Applied Sciences, 2020. **10**, DOI: 10.3390/app10103492.

[31] Lee, J., A.K. Sarmah, and E.E. Kwon, *Chapter 1 - Production and Formation of Biochar*, in *Biochar from Biomass and Waste*, Y.S. Ok, et al., Editors. 2019, Elsevier. p. 3-18.

[32] Daful, A.G. and M. R Chandraratne, *Biochar Production From Biomass Waste-Derived Material*, in *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials*, S. Hashmi and I.A. Choudhury, Editors. 2020, Elsevier: Oxford. p. 370-378.

[33] Zote, S., D. Kulal, and P. Ranade, *BIOCHAR II: SYNTHESIS, CHARACTERIZATION AND APPLICATION*. 2022. p. 111-127.

[34] Basu, P., *Chapter 5 - Pyrolysis*, in *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction (Third Edition)*, P. Basu, Editor. 2018, Academic Press. p. 155-187.

[35] Masek, O., et al., *Biochar characterization methods*. 2020.

[36] Armah, E., et al., *Biochar: Production, Application and the Future*. 2022.

[37] Leng, L., et al., *An overview on engineering the surface area and porosity of biochar.* Science of The Total Environment, 2021. **763**: p. 144204.

[38] Weber, K. and P. Quicker, *Properties of biochar.* Fuel, 2018. **217**: p. 240-261.

[39] Sharifi Pajaie, S.H., S. Archin, and G. Asadpour, *Optimization of Process Parameters by Response Surface Methodology for Methylene Blue Removal Using Cellulose Dusts.* Civil Engineering Journal, 2018. **4**: p. 620.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[40] Zhang, X., et al., *Effect of pyrolysis temperature and correlation analysis on the yield and physicochemical properties of crop residue biochar.* Bioresource Technology, 2020. **296**: p. 122318.

[41] Adesemuyi, M.F., et al., *Preparation and characterisation of biochars from elephant grass and their utilisation for aqueous nitrate removal: Effect of pyrolysis temperature.* Journal of Environmental Chemical Engineering, 2020. **8**(6): p. 104507.

[42] Cole, E.J., et al., *Dataset on the effect of hardwood biochar on soil gravimetric moisture content and nitrate dynamics at different soil depths with FTIR analysis of fresh and aged biochar.* Data in Brief, 2019. **25**: p. 104073.

[43] Sarfaraz, Q., et al., *Characterization and carbon mineralization of biochars produced from different animal manures and plant residues.* Scientific Reports, 2020. **10**(1): p. 955.

[44] Reza, D., et al., *Biochar characterization of invasive Pennisetum purpureum grass: effect of pyrolysis temperature.* Biochar, 2020. **2**: p. 3.

[45] Liu, Z., et al., *Comparative analysis of the properties of biochars produced from different pecan feedstocks and pyrolysis temperatures.* Industrial Crops and Products, 2023. **197**: p. 116638.

[46] Güleç, F., et al., *A comprehensive comparative study on methylene blue removal from aqueous solution using biochars produced from rapeseed, whitewood, and seaweed via different thermal conversion technologies.* Fuel, 2022. **330**: p. 125428.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ค่าเฉลี่ยของร้อยละผลผลิตของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกแต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 ค่าเฉลี่ยของร้อยละผลผลิตของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกแต่ละชนิด ที่อุณหภูมิ 500 ℃ และ 700 ℃

Sample	T (°C)	Yield (%)				
		n_1	n_2	n_3	Avg	SD
LB	500 ℃	30.54	28.54	28.48	29.19	1.17
	700 ℃	29.18	30.26	27.30	28.91	1.50
KB	500 ℃	27.28	27.14	27.65	27.36	0.26
	700 ℃	26.41	28.90	25.95	27.08	1.59
SB	500 ℃	35.72	36.88	36.98	36.53	0.70
	700 ℃	34.69	34.12	34.41	34.41	0.29
LKB	500 ℃	30.93	28.42	28.56	29.30	1.41
	700 ℃	27.29	27.32	26.31	26.97	0.58
LSB	500 ℃	31.11	31.68	31.68	31.49	0.33
	700 ℃	30.13	30.42	30.28	30.28	0.15
KSB	500 ℃	33.99	32.74	31.57	32.77	1.21
	700 ℃	30.21	31.56	30.28	30.88	0.67
LKSB	500 ℃	30.72	30.26	30.49	30.49	0.23
	700 ℃	29.37	29.20	29.29	29.29	0.09

n_1, n_2, n_3 คือ การทดลองครั้งที่ 1, การทดลองครั้งที่ 2 และการทดลองครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ความกว้างรูพรุนโดยเฉลี่ย และปริมาตรรูพรุนของไบโอชาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจ าเพาะ ความกว้างรูพรุนโดยเฉลี่ย และปริมาตรรูพรุนของไบโอชาร์จากเปลือกมะนาวที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C

Surface Area	
Single point surface area at p/p° = 0.299592277:	0.6493 m²/g
BET Surface Area:	**0.6813 m²/g**
t-Plot Micropore Area:	0.3637 m²/g
t-Plot external surface area:	0.3176 m²/g
BJH Adsorption cumulative surface area of pores	
- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	0.2315 m²/g
BJH Desorption cumulative surface area of pores	
- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	0.3356 m²/g
Pore Volume	
Single point adsorption total pore volume of pores	
- less than 0.9467 nm width at p/p° = 0.010578594:	0.000193 cm³/g
Single point desorption total pore volume of pores	
- less than 20.7391 nm width at p/p° = 0.900000000:	0.000415 cm³/g
t-Plot micropore volume:	0.000199 cm³/g
BJH Adsorption cumulative volume of pores	
- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	0.002596 cm³/g
BJH Desorption cumulative volume of pores	
- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	0.002834 cm³/g
Pore Size	
Adsorption average pore diameter (4V/A by BET):	1.1316 nm
Desorption average pore diameter (4V/A by BET):	2.4367 nm
BJH Adsorption average pore width (4V/A):	44.8523 nm
BJH Desorption average pore width (4V/A):	**33.7728 nm**
DFT Pore Size	
Volume in Pores	0.00019 cm³/g
Total Volume in Pores	**0.00024 cm³/g**
Area in Pores	0.000 m²/g
Total Area in Pores	0.19 m²/g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจ าเพาะ ความกว้างรูพรุนโดยเฉลี่ย และปริมาตรรูพรุนของไบโอชาร์จากเปลือกมะนาวที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C

Surface Area	
Single point surface area at p/p° = 0.299403106:	3.7929 m²/g
BET Surface Area:	**3.8606 m²/g**
t-Plot Micropore Area:	3.2037 m²/g
t-Plot external surface area:	0.6568 m²/g
BJH Adsorption cumulative surface area of pores	
- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	0.5629 m²/g
BJH Desorption cumulative surface area of pores	
- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	0.5512 m²/g
Pore Volume	
Single point adsorption total pore volume of pores	
- less than 0.9467 nm width at p/p° = 0.010000000:	0.001634 cm³/g
Single point desorption total pore volume of pores	
- less than 20.7391 nm width at p/p° = 0.900000000:	0.002825 cm³/g
t-Plot micropore volume:	0.001645 cm³/g
BJH Adsorption cumulative volume of pores	
- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	0.006192 cm³/g
BJH Desorption cumulative volume of pores	
- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	0.006088 cm³/g
Pore Size	
Adsorption average pore diameter (4V/A by BET):	1.6927 nm
Desorption average pore diameter (4V/A by BET):	2.9269 nm
BJH Adsorption average pore width (4V/A):	**43.9996 nm**
BJH Desorption average pore width (4V/A):	44.1809 nm
DFT Pore Size	
Volume in Pores	0.00139 cm³/g
Total Volume in Pores	**0.00171 cm³/g**
Area in Pores	0.000 m²/g
Total Area in Pores	0.132 m²/g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจ าเพาะ ความกว้างรูพรุนโดยเฉลี่ย และปริมาตรรูพรุนของไบโอชาร์จากเปลือกส้มจี๊ดที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 ℃

Surface Area		
	Single point surface area at p/p° = 0.269314733:	0.8160 m²/g
	BET Surface Area:	**0.7576 m²/g**
	t-Plot Micropore Area:	2.3048 m²/g
	t-Plot external surface area:	-1.5472 m²/g
	BJH Adsorption cumulative surface area of pores	
	- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	0.5089 m²/g
	BJH Desorption cumulative surface area of pores	
	- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	0.8932 m²/g
Pore Volume		
	Single point adsorption total pore volume of pores	
	- less than 0.9467 nm width at p/p° = 0.010999794:	0.000507 cm³/g
	Single point desorption total pore volume of pores	
	- less than 20.7391 nm width at p/p° = 0.900000000:	0.001175 cm³/g
	t-Plot micropore volume:	0.001162 cm³/g
	BJH Adsorption cumulative volume of pores	
	- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	0.006017 cm³/g
	BJH Desorption cumulative volume of pores	
	- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	0.006426 cm³/g
Pore Size		
	Adsorption average pore diameter (4V/A by BET):	2.6769 nm
	Desorption average pore diameter (4V/A by BET):	6.2045 nm
	BJH Adsorption average pore width (4V/A):	**47.2998 nm**
	BJH Desorption average pore width (4V/A):	28.7779 nm
DFT Pore Size		
	Volume in Pores	0.00021 cm³/g
	Total Volume in Pores	**0.00021 cm³/g**
	Area in Pores	0.000 m²/g
	Total Area in Pores	0.000 m²/g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.4 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจ าเพาะ ความกว้างรูพรุนโดยเฉลี่ย และปริมาตรรูพรุนของไบโอชาร์จากเปลือกส้มจี๊ดที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C

Surface Area		
	Single point surface area at p/p° = 0.299320887:	2.7423 m²/g
	BET Surface Area:	**2.8302 m²/g**
	t-Plot Micropore Area:	1.6889 m²/g
	t-Plot external surface area:	1.1413 m²/g
	BJH Adsorption cumulative surface area of pores	
	- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	0.5449 m²/g
	BJH Desorption cumulative surface area of pores	
	- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	0.1451 m²/g
Pore Volume		
	Single point adsorption total pore volume of pores	
	- less than 0.9467 nm width at p/p° = 0.011234186:	0.000958 cm³/g
	Single point desorption total pore volume of pores	
	- less than 20.7391 nm width at p/p° = 0.900000000:	0.001724 cm³/g
	t-Plot micropore volume:	0.000882 cm³/g
	BJH Adsorption cumulative volume of pores	
	- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	0.002159 cm³/g
	BJH Desorption cumulative volume of pores	
	- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	0.001803 cm³/g
Pore Size		
	Adsorption average pore diameter (4V/A by BET):	1.3541 nm
	Desorption average pore diameter (4V/A by BET):	2.4369 nm
	BJH Adsorption average pore width (4V/A):	**15.8482 nm**
	BJH Desorption average pore width (4V/A):	49.7185 nm
DFT Pore Size		
	Volume in Pores	0.00072 cm³/g
	Total Volume in Pores	**0.00107 cm³/g**
	Area in Pores	0.000 m²/g
	Total Area in Pores	0.425 m²/g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจ าเพาะ ความกว้างรูพรุนโดยเฉลี่ย และปริมาตรรูพรุนของไบโอชาร์จากเปลือกสละที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C

Surface Area		
	Single point surface area at p/p° = 0.299729003:	69.8921 m²/g
	BET Surface Area:	**70.8743 m²/g**
	t-Plot Micropore Area:	64.3354 m²/g
	t-Plot external surface area:	6.5389 m²/g
	BJH Adsorption cumulative surface area of pores	
	- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	2.3380 m²/g
	BJH Desorption cumulative surface area of pores	
	- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	0.3760 m²/g
Pore Volume		
	Single point adsorption total pore volume of pores	
	- less than 0.9467 nm width at p/p° = 0.011212451:	0.031460 cm³/g
	Single point desorption total pore volume of pores	
	- less than 20.7391 nm width at p/p° = 0.900000000:	0.035516 cm³/g
	t-Plot micropore volume:	0.032758 cm³/g
	BJH Adsorption cumulative volume of pores	
	- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	0.007457 cm³/g
	BJH Desorption cumulative volume of pores	
	- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	0.006742 cm³/g
Pore Size		
	Adsorption average pore diameter (4V/A by BET):	1.7755 nm
	Desorption average pore diameter (4V/A by BET):	2.0044 nm
	BJH Adsorption average pore width (4V/A):	**12.7574 nm**
	BJH Desorption average pore width (4V/A):	71.7225 nm
DFT Pore Size		
	Volume in Pores	0.02675 cm³/g
	Total Volume in Pores	**0.02756 cm³/g**
	Area in Pores	0.000 m²/g
	Total Area in Pores	0.975 m²/g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.6 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจ าเพาะ ความกว้างรูพรุนโดยเฉลี่ย และปริมาตรรูพรุนของไบโอชาร์จากเปลือกสละที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C

Surface Area	
Single point surface area at p/p° = 0.249779118:	36.9060 m²/g
BET Surface Area:	**34.6714 m²/g**
t-Plot Micropore Area:	32.4073 m²/g
t-Plot external surface area:	2.2641 m²/g
BJH Adsorption cumulative surface area of pores	
- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	0.9327 m²/g
BJH Desorption cumulative surface area of pores	
- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	0.3140 m²/g
Pore Volume	
Single point adsorption total pore volume of pores	
- less than 0.9467 nm width at p/p° = 0.010000000:	0.014140 cm³/g
Single point desorption total pore volume of pores	
- less than 20.7391 nm width at p/p° = 0.900000000:	0.015864 cm³/g
t-Plot micropore volume:	0.016594 cm³/g
BJH Adsorption cumulative volume of pores	
- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	0.003380 cm³/g
BJH Desorption cumulative volume of pores	
- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	0.004520 cm³/g
Pore Size	
Adsorption average pore diameter (4V/A by BET):	1.6314 nm
Desorption average pore diameter (4V/A by BET):	1.8302 nm
BJH Adsorption average pore width (4V/A):	**14.4950 nm**
BJH Desorption average pore width (4V/A):	57.5790 nm
DFT Pore Size	
Volume in Pores	0.01288 cm³/g
Total Volume in Pores	**0.01288 cm³/g**
Area in Pores	0.000 m²/g
Total Area in Pores	0.000 m²/g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.7 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจ าเพาะ ความกว้างรูพรุนโดยเฉลี่ย และปริมาตรรูพรุนของไบโอชาร์จากเปลือกมะนาว – ส้มจี๊ดที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C

Surface Area		
	Single point surface area at p/p° = 0.269435066:	0.2658 m²/g
	BET Surface Area:	**0.2337 m²/g**
	t-Plot Micropore Area:	2.1497 m²/g
	t-Plot external surface area:	-1.9159 m²/g
	BJH Adsorption cumulative surface area of pores	
	- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	0.2115 m²/g
	BJH Desorption cumulative surface area of pores	
	- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	0.3595 m²/g
Pore Volume		
	Single point adsorption total pore volume of pores	
	- less than 0.9467 nm width at p/p° = 0.011580205:	0.000383 cm³/g
	t-Plot micropore volume:	0.001068 cm³/g
	BJH Adsorption cumulative volume of pores	
	- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	0.003323 cm³/g
	BJH Desorption cumulative volume of pores	
	- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	0.003641 cm³/g
Pore Size		
	Adsorption average pore diameter (4V/A by BET):	6.5537 nm
	BJH Adsorption average pore width (4V/A):	**62.8648 nm**
	BJH Desorption average pore width (4V/A):	40.5151 nm
DFT Pore Size		
	Volume in Pores	0.00025 cm³/g
	Total Volume in Pores	**0.00025 cm³/g**
	Area in Pores	0.000 m²/g
	Total Area in Pores	0.000 m²/g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.8 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจ าเพาะ ความกว้างรูพรุนโดยเฉลี่ย และปริมาตรรูพรุนของไบโอชาร์จากเปลือกมะนาว - ส้มจี๊ดที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 ℃

Surface Area		
	Single point surface area at p/p° = 0.299362454:	1.0347 m²/g
	BET Surface Area:	**1.0729 m²/g**
	t-Plot Micropore Area:	1.0484 m²/g
	t-Plot external surface area:	0.0245 m²/g
	BJH Adsorption cumulative surface area of pores	
	- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	0.1571 m²/g
	BJH Desorption cumulative surface area of pores	
	- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	0.2167 m²/g
Pore Volume		
	Single point adsorption total pore volume of pores	
	- less than 0.9467 nm width at p/p° = 0.011218684:	0.000462 cm³/g
	Single point desorption total pore volume of pores	
	- less than 20.7391 nm width at p/p° = 0.900000000:	0.000530 cm³/g
	t-Plot micropore volume:	0.000547 cm³/g
	BJH Adsorption cumulative volume of pores	
	- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	0.002111 cm³/g
	BJH Desorption cumulative volume of pores	
	- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	0.002427 cm³/g
Pore Size		
	Adsorption average pore diameter (4V/A by BET):	1.7221 nm
	Desorption average pore diameter (4V/A by BET):	1.9763 nm
	BJH Adsorption average pore width (4V/A):	**53.7430 nm**
	BJH Desorption average pore width (4V/A):	44.8009 nm
DFT Pore Size		
	Volume in Pores	0.00031 cm³/g
	Total Volume in Pores	**0.00031 cm³/g**
	Area in Pores	0.000 m²/g
	Total Area in Pores	0.000 m²/g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.9 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจ าเพาะ ความกว้างรูพรุนโดยเฉลี่ย และปริมาตรรูพรุนของไบโอชาร์จากเปลือกมะนาว - สละที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 ℃

Surface Area		
	Single point surface area at p/p° = 0.269415137:	1.7451 m²/g
	BET Surface Area:	**1.6564 m²/g**
	t-Plot Micropore Area:	2.7229 m²/g
	t-Plot external surface area:	-1.0665 m²/g
	BJH Adsorption cumulative surface area of pores	
	- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	0.1921 m²/g
	BJH Desorption cumulative surface area of pores	
	- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	0.2226 m²/g
Pore Volume		
	Single point adsorption total pore volume of pores	
	- less than 0.9467 nm width at p/p° = 0.010000000:	0.000808 cm³/g
	Single point desorption total pore volume of pores	
	- less than 20.7391 nm width at p/p° = 0.900000000:	0.000904 cm³/g
	t-Plot micropore volume:	0.001384 cm³/g
	BJH Adsorption cumulative volume of pores	
	- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	0.002335 cm³/g
	BJH Desorption cumulative volume of pores	
	- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	0.002622 cm³/g
Pore Size		
	Adsorption average pore diameter (4V/A by BET):	1.9501 nm
	Desorption average pore diameter (4V/A by BET):	2.1825 nm
	BJH Adsorption average pore width (4V/A):	**48.6306 nm**
	BJH Desorption average pore width (4V/A):	47.1175 nm
DFT Pore Size		
	Volume in Pores	0.00046 cm³/g
	Total Volume in Pores	**0.00046 cm³/g**
	Area in Pores	0.000 m²/g
	Total Area in Pores	0.000 m²/g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.10 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจ าเพาะ ความกว้างรูพรุนโดยเฉลี่ย และปริมาตรรูพรุนของไบโอชาร์จากเปลือกมะนาว - สละที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C

Surface Area		
	Single point surface area at p/p° = 0.299288283:	16.3708 m²/g
	BET Surface Area:	**16.6478 m²/g**
	t-Plot Micropore Area:	13.1634 m²/g
	t-Plot external surface area:	3.4844 m²/g
	BJH Adsorption cumulative surface area of pores	
	- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	1.3670 m²/g
	BJH Desorption cumulative surface area of pores	
	- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	0.1839 m²/g
Pore Volume		
	Single point adsorption total pore volume of pores	
	- less than 0.9467 nm width at p/p° = 0.010000000:	0.006883 cm³/g
	Single point desorption total pore volume of pores	
	- less than 20.7391 nm width at p/p° = 0.900000000:	0.009133 cm³/g
	t-Plot micropore volume:	0.006750 cm³/g
	BJH Adsorption cumulative volume of pores	
	- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	0.003482 cm³/g
	BJH Desorption cumulative volume of pores	
	- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	0.002303 cm³/g
Pore Size		
	Adsorption average pore diameter (4V/A by BET):	1.6538 nm
	Desorption average pore diameter (4V/A by BET):	2.1945 nm
	BJH Adsorption average pore width (4V/A):	**10.1888 nm**
	BJH Desorption average pore width (4V/A):	50.0947 nm
DFT Pore Size		
	Volume in Pores	0.00543 cm³/g
	Total Volume in Pores	**0.00663 cm³/g**
	Area in Pores	0.000 m²/g
	Total Area in Pores	1.431 m²/g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.11 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจ าเพาะ ความกว้างรูพรุนโดยเฉลี่ย และปริมาตรรูพรุนของไบโอชาร์จากเปลือกส้มจี๊ด - สละที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C

Surface Area		
	Single point surface area at p/p° = 0.269498908:	4.3613 m²/g
	BET Surface Area:	**4.1712 m²/g**
	t-Plot Micropore Area:	6.2891 m²/g
	t-Plot external surface area:	-2.1179 m²/g
	BJH Adsorption cumulative surface area of pores	
	- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	0.2648 m²/g
	BJH Desorption cumulative surface area of pores	
	- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	0.3625 m²/g
Pore Volume		
	Single point adsorption total pore volume of pores	
	- less than 0.9467 nm width at p/p° = 0.010000000:	0.002021 cm³/g
	Single point desorption total pore volume of pores	
	- less than 20.7391 nm width at p/p° = 0.900000000:	0.002055 cm³/g
	t-Plot micropore volume:	0.003192 cm³/g
	BJH Adsorption cumulative volume of pores	
	- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	0.003562 cm³/g
	BJH Desorption cumulative volume of pores	
	- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	0.004173 cm³/g
Pore Size		
	Adsorption average pore diameter (4V/A by BET):	1.9378 nm
	Desorption average pore diameter (4V/A by BET):	1.9705 nm
	BJH Adsorption average pore width (4V/A):	**53.8022 nm**
	BJH Desorption average pore width (4V/A):	46.0503 nm
DFT Pore Size		
	Volume in Pores	0.00125 cm³/g
	Total Volume in Pores	**0.00125 cm³/g**
	Area in Pores	0.000 m²/g
	Total Area in Pores	0.000 m²/g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.12 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจ าเพาะ ความกว้างรูพรุนโดยเฉลี่ย และปริมาตรรูพรุนของไบโอชาร์จากเปลือกส้มจี๊ด - สละที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C

Surface Area		
	Single point surface area at p/p° = 0.299324168:	3.9576 m²/g
	BET Surface Area:	**4.0349 m²/g**
	t-Plot Micropore Area:	3.6917 m²/g
	t-Plot external surface area:	0.3432 m²/g
	BJH Adsorption cumulative surface area of pores	
	- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	0.3802 m²/g
	BJH Desorption cumulative surface area of pores	
	- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	0.3038 m²/g
Pore Volume		
	Single point adsorption total pore volume of pores	
	- less than 0.9467 nm width at p/p° = 0.010000000:	0.001826 cm³/g
	Single point desorption total pore volume of pores	
	- less than 20.7391 nm width at p/p° = 0.900000000:	0.002557 cm³/g
	t-Plot micropore volume:	0.001898 cm³/g
	BJH Adsorption cumulative volume of pores	
	- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	0.003273 cm³/g
	BJH Desorption cumulative volume of pores	
	- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	0.003165 cm³/g
Pore Size		
	Adsorption average pore diameter (4V/A by BET):	1.8098 nm
	Desorption average pore diameter (4V/A by BET):	2.5350 nm
	BJH Adsorption average pore width (4V/A):	**34.4405 nm**
	BJH Desorption average pore width (4V/A):	41.6825 nm
DFT Pore Size		
	Volume in Pores	0.00148 cm³/g
	Total Volume in Pores	**0.00148 cm³/g**
	Area in Pores	0.000 m²/g
	Total Area in Pores	0.000 m²/g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.13 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจ าเพาะ ความกว้างรูพรุนโดยเฉลี่ย และปริมาตรรูพรุนของไบโอชาร์จากเปลือกมะนาว - ส้มจี๊ด - สละที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C

Surface Area	
Single point surface area at p/p° = 0.119954501:	21.4505 m²/g
BET Surface Area:	**20.4307 m²/g**
t-Plot Micropore Area:	23.0907 m²/g
t-Plot external surface area:	-2.6600 m²/g
BJH Adsorption cumulative surface area of pores	
- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	0.1368 m²/g
BJH Desorption cumulative surface area of pores	
- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	0.2473 m²/g
Pore Volume	
Single point adsorption total pore volume of pores	
- less than 0.9467 nm width at p/p° = 0.010000000:	0.008080 cm³/g
Single point desorption total pore volume of pores	
- less than 20.7391 nm width at p/p° = 0.900000000:	0.007623 cm³/g
t-Plot micropore volume:	0.009661 cm³/g
BJH Adsorption cumulative volume of pores	
- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	0.001967 cm³/g
BJH Desorption cumulative volume of pores	
- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	0.002862 cm³/g
Pore Size	
Adsorption average pore diameter (4V/A by BET):	1.5820 nm
Desorption average pore diameter (4V/A by BET):	1.4924 nm
BJH Adsorption average pore width (4V/A):	**57.5020 nm**
BJH Desorption average pore width (4V/A):	46.2887 nm
DFT Pore Size	
Volume in Pores	0.00612 cm³/g
Total Volume in Pores	**0.00612 cm³/g**
Area in Pores	0.000 m²/g
Total Area in Pores	0.000 m²/g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.14 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจ าเพาะ ความกว้างรูพรุนโดยเฉลี่ย และปริมาตรรูพรุนของไบโอชาร์จากเปลือกมะนาว - ส้มจี๊ด - สละที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C

Surface Area		
	Single point surface area at p/p° = 0.140680975:	32.6906 m²/g
	BET Surface Area:	**32.6873 m²/g**
	t-Plot Micropore Area:	27.1552 m²/g
	t-Plot external surface area:	5.5321 m²/g
	BJH Adsorption cumulative surface area of pores	
	- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	2.0552 m²/g
	BJH Desorption cumulative surface area of pores	
	- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	0.1653 m²/g
Pore Volume		
	Single point adsorption total pore volume of pores	
	- less than 0.9467 nm width at p/p° = 0.010398267:	0.011458 cm³/g
	Single point desorption total pore volume of pores	
	- less than 20.7391 nm width at p/p° = 0.900000000:	0.014042 cm³/g
	t-Plot micropore volume:	0.011269 cm³/g
	BJH Adsorption cumulative volume of pores	
	- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	0.003148 cm³/g
	BJH Desorption cumulative volume of pores	
	- between 1.7000 nm and 300.0000 nm width:	0.002066 cm³/g
Pore Size		
	Adsorption average pore diameter (4V/A by BET):	1.4021 nm
	Desorption average pore diameter (4V/A by BET):	1.7183 nm
	BJH Adsorption average pore width (4V/A):	**6.1261 nm**
	BJH Desorption average pore width (4V/A):	49.9872 nm
DFT Pore Size		
	Volume in Pores	0.00932 cm³/g
	Total Volume in Pores	**0.01079 cm³/g**
	Area in Pores	0.000 m²/g
	Total Area in Pores	1.777 m²/g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ของไบโอชาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ค.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ของไบโอชาร์

ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
อาคารสถาบัน 3 ชั้น 3 จุฬาซอย 62 ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทร. (662) 218-8101, 218-8033 โทรสาร (662) 218-8101, 254-0211
SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL RESEARCH EQUIPMENT CENTRE CHULALONGKORN UNIVERSITY
CHULALONGKORN SOI 62 PHAYA-THAI ROAD PHATUMWAN BANGKOK 10330 THAILAND TEL: (662) 218-8101, 218-8033 FAX : (662) 218-8101, 254-0211

Report number: 660202-0326/2 Page 1/3

Analysis Report

Sample Biochar
Sample Owner Tharathep Khamthai
Objective To quantitate percentages of C, H, N and S elements.
Instrument CHNS/O Analyzer (Thermo Scientific™ FLASH 2000)
Method Gaseous products freed by pyrolysis in high-purity oxygen and were chromatographically separated by elution development with quantitatively detected by thermal conductivity detector.
Analysis Date 17 February 2023

Result

Sample Name		%Carbon	%Hydrogen	%Nitrogen	%Sulfur
LB500	(1)	70.80	1.78	1.38	0.00
	(2)	68.43	1.66	1.20	0.00
	Average	**69.62**	**1.72**	**1.29**	**0.00**
LB700	(1)	69.92	0.69	1.43	0.00
	(2)	69.78	0.72	1.45	0.00
	Average	**69.85**	**0.71**	**1.44**	**0.00**
KB500	(1)	71.77	1.74	1.72	0.00
	(2)	71.45	1.69	1.63	0.00
	Average	**71.61**	**1.72**	**1.68**	**0.00**
KB700	(1)	71.60	0.54	1.72	0.00
	(2)	70.65	0.76	1.69	0.00
	Average	**71.13**	**0.65**	**1.71**	**0.00**

ออ/อร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report number: 660202-0326/2

Sample Name		%Carbon	%Hydrogen	%Nitrogen	%Sulfur
SB500	(1)	73.63	1.38	0.06	0.09
	(2)	73.73	1.63	0.08	0.13
	Average	**73.68**	**1.51**	**0.07**	**0.11**
SB700	(1)	73.42	0.72	0.21	0.00
	(2)	72.09	0.67	0.06	0.00
	Average	**72.76**	**0.70**	**0.14**	**0.00**
LKB500	(1)	69.86	1.65	1.37	0.00
	(2)	69.64	1.66	1.34	0.00
	Average	**69.75**	**1.66**	**1.36**	**0.00**
LKB700	(1)	70.69	0.84	1.44	0.00
	(2)	71.11	0.72	1.60	0.00
	Average	**70.90**	**0.78**	**1.52**	**0.00**
LSB500	(1)	70.79	1.40	0.60	0.00
	(2)	70.27	1.38	0.69	0.06
	Average	**70.53**	**1.39**	**0.65**	**0.03**
LSB700	(1)	71.84	0.92	0.69	0.00
	(2)	71.82	0.79	0.64	0.00
	Average	**71.83**	**0.86**	**0.67**	**0.00**
KSB500	(1)	71.81	1.33	0.79	0.00
	(2)	72.40	1.44	0.65	0.00
	Average	**72.11**	**1.39**	**0.72**	**0.00**
KSB700	(1)	73.27	0.56	0.81	0.00
	(2)	72.22	0.60	0.83	0.00
	Average	**72.75**	**0.58**	**0.82**	**0.00**

ออ/อร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report number: 660202-0326/2

Sample Name		%Carbon	%Hydrogen	%Nitrogen	%Sulfur
LKSB500	(1)	70.21	1.54	0.82	0.00
	(2)	70.77	1.26	0.76	0.00
	Average	**70.49**	**1.40**	**0.79**	**0.00**
LKSB700	(1)	72.46	0.57	1.02	0.00
	(2)	72.47	0.88	0.83	0.00
	Average	**72.47**	**0.73**	**0.93**	**0.00**

(Miss Araya Roengsumran) Analyst

(Miss Kaew Kajornchaiyakul) Chief Scientist

(Assoc.Prof. Dr. Apichat Imyim) Director

Remark : The results are good only for those samples analysed.

ออ/อร

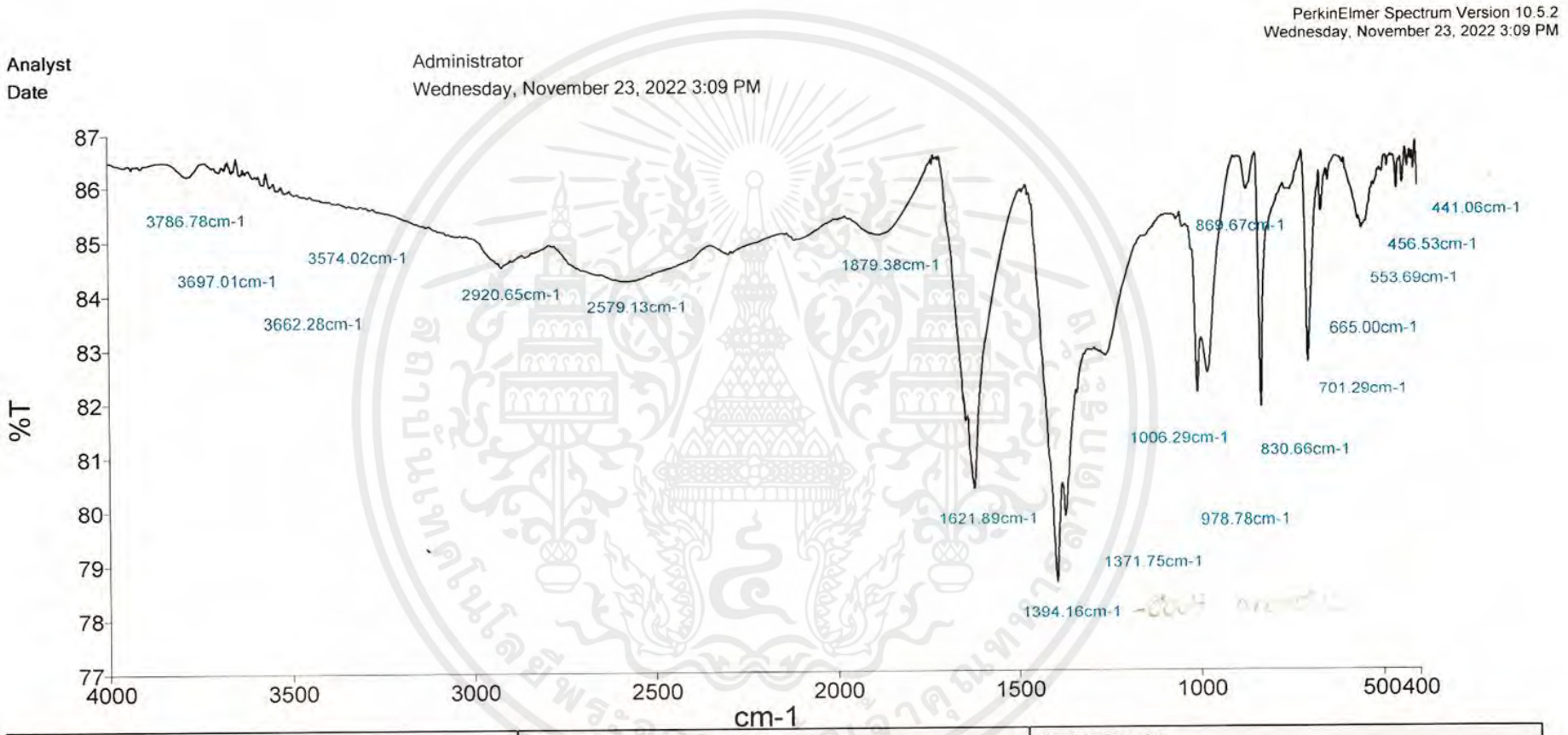
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์

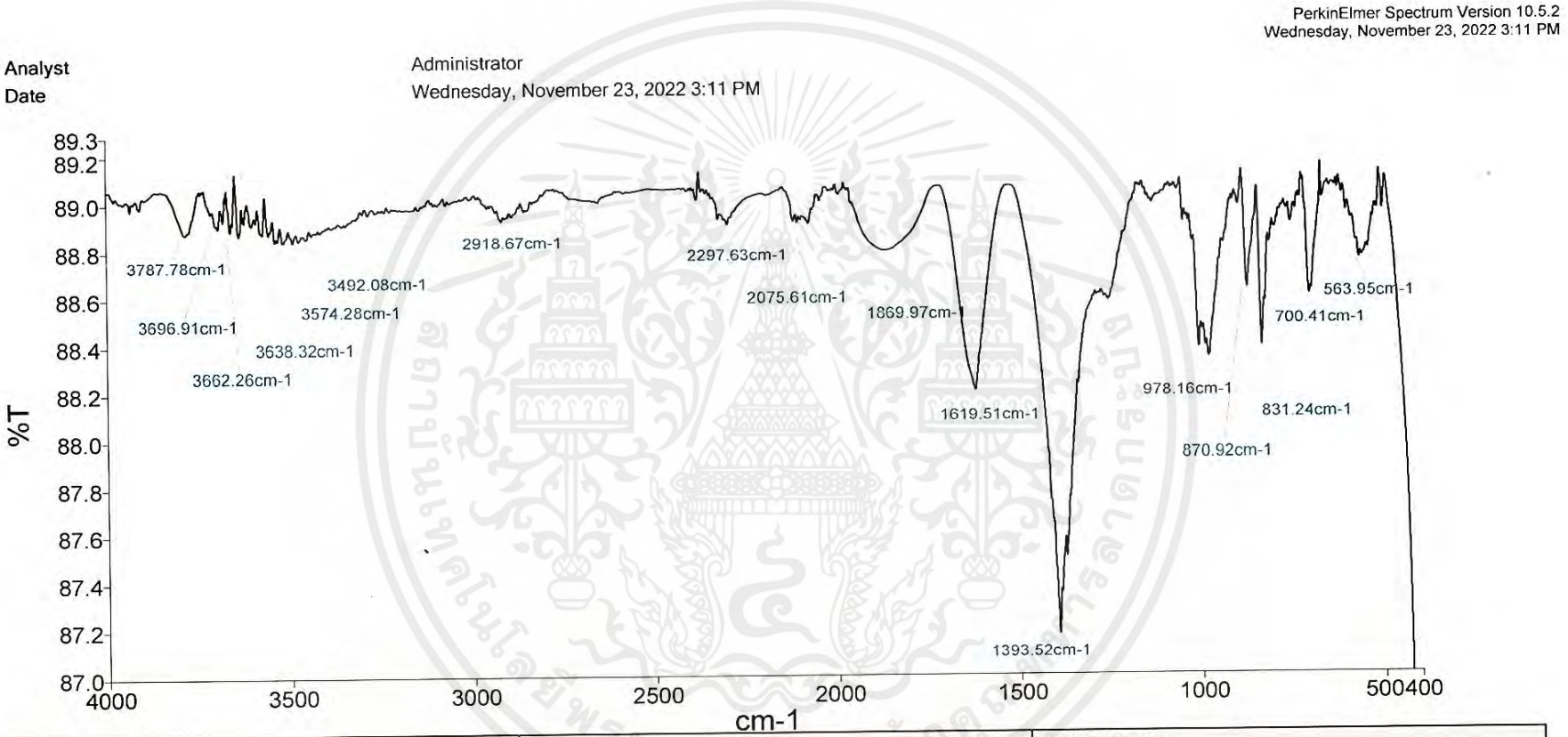
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ง.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการท างนบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ท าจากเปลือกมะนาว ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C



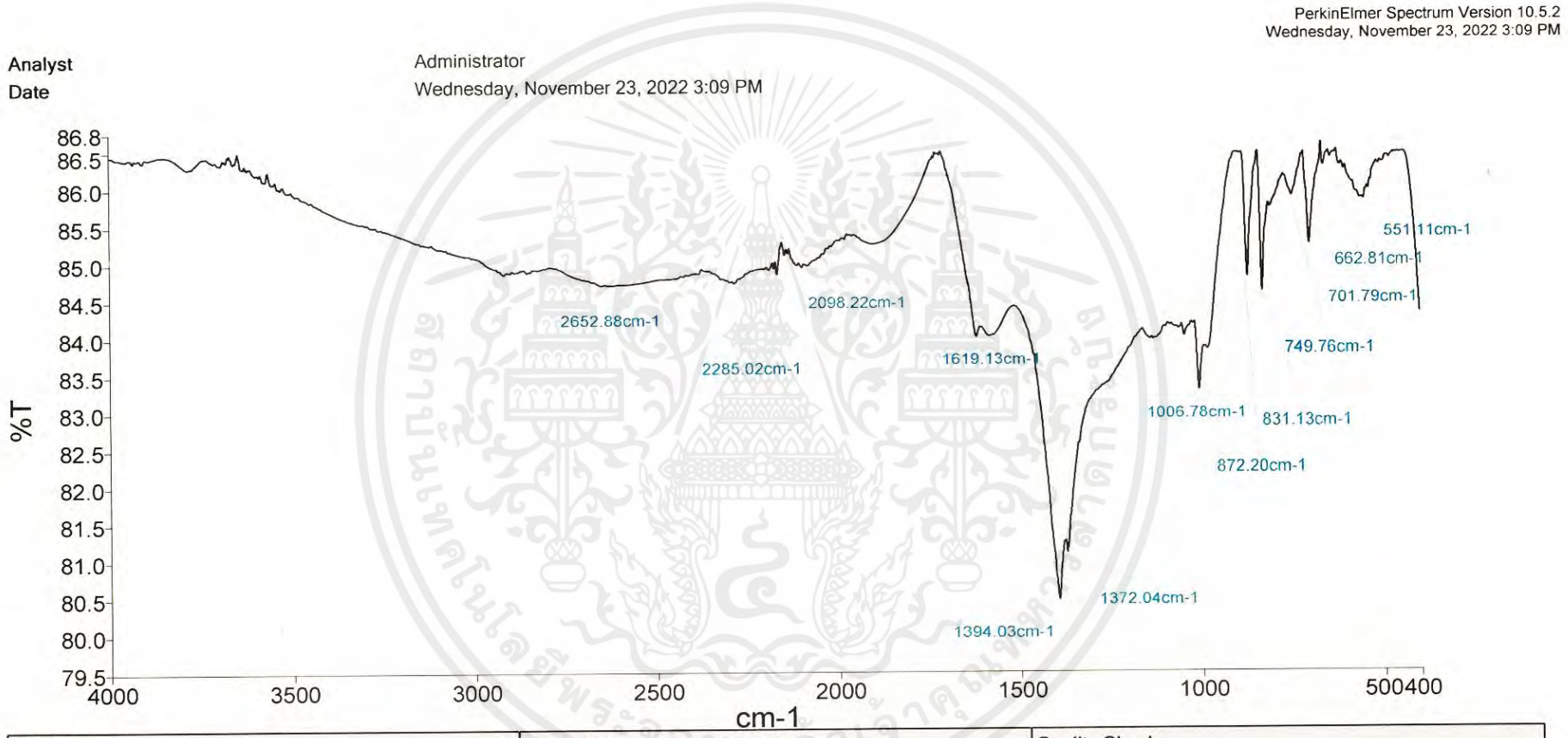
Sample Name	Description	Quality Checks
LBC-500_1	Sample 083 By Administrator Date Wednesday, November 23 2022	The Quality Checks give rise to a Weak Bands warning for the sample.

รูปที่ ง.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการท างนบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ท าจากเปลือกมะนาว ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C



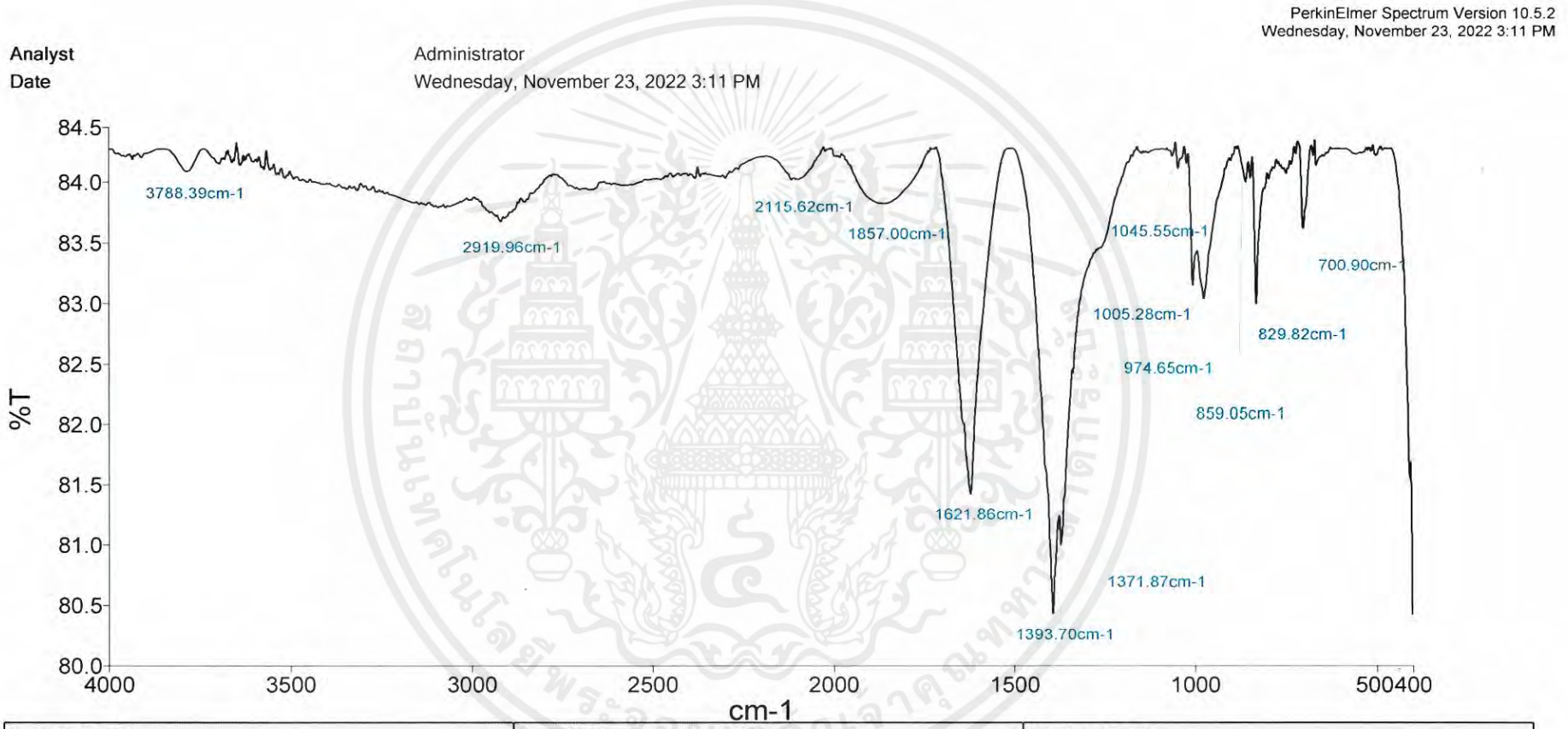
Sample Name	Description	Quality Checks
LBC-700_1	Sample 089 By Administrator Date Wednesday, November 23 2022	The Quality Checks give rise to a Weak Bands warning for the sample.

รูปที่ ง.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกส้มจี๊ด ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C



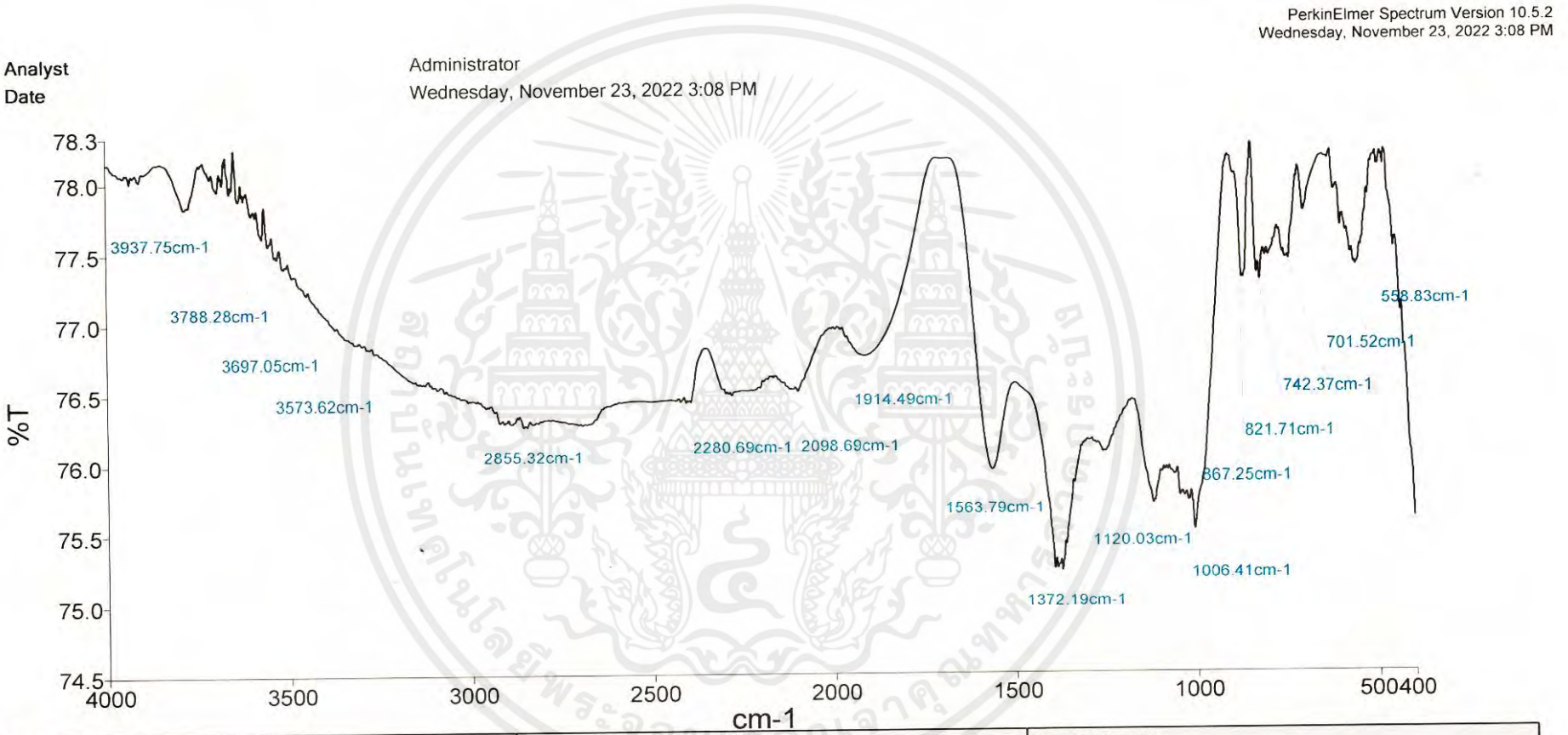
Sample Name	Description	Quality Checks
KBC-500_1	Sample 084 By Administrator Date Wednesday, November 23 2022	The Quality Checks give rise to multiple warnings for the sample.

รูปที่ ง.4 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกส้มจี๊ด ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C



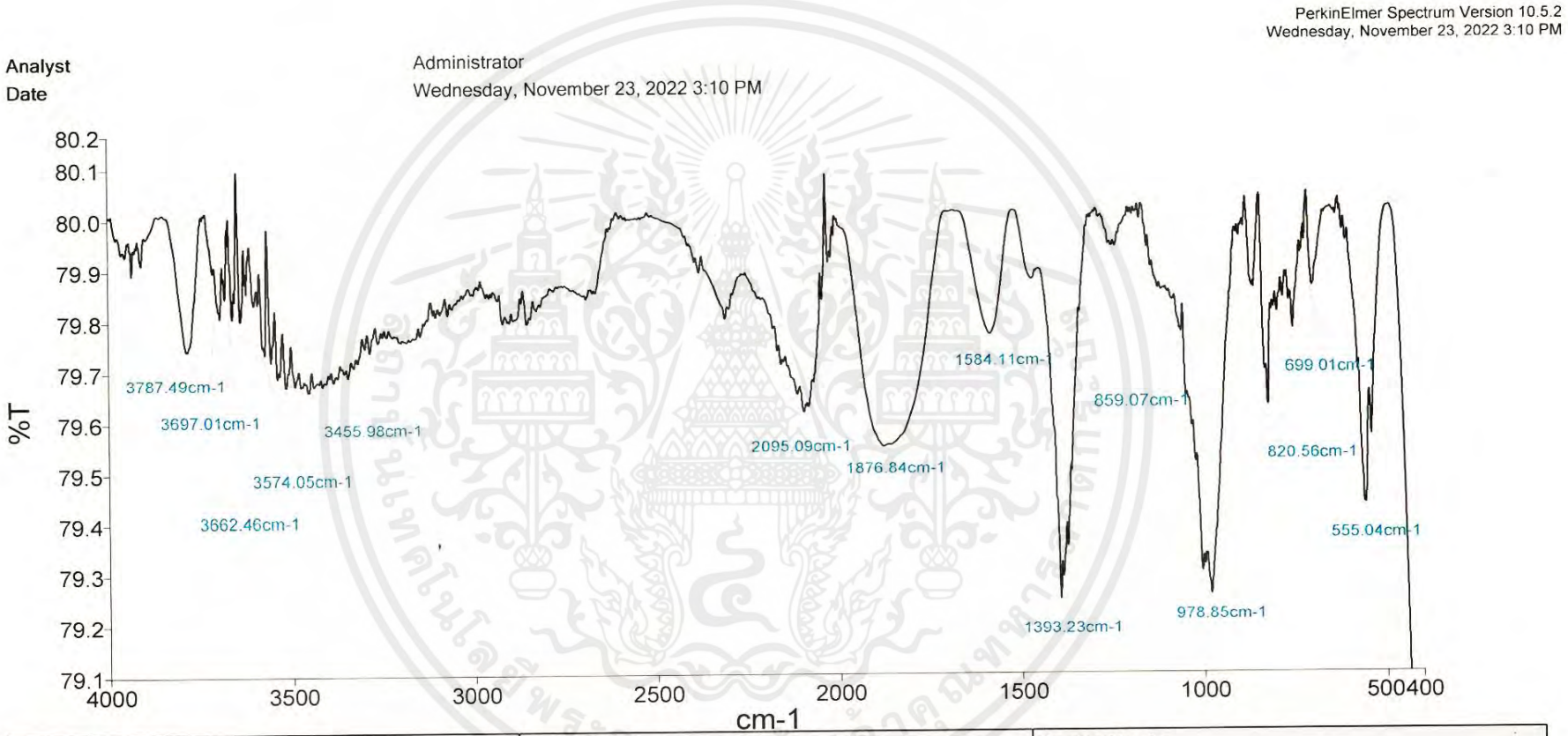
Sample Name	Description	Quality Checks
KBC-700_1	Sample 086 By Administrator Date Wednesday, November 23 2022	The Quality Checks give rise to a Weak Bands warning for the sample.

รูปที่ ง.5 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทางานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ท าจากเปลือกสละ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 ℃



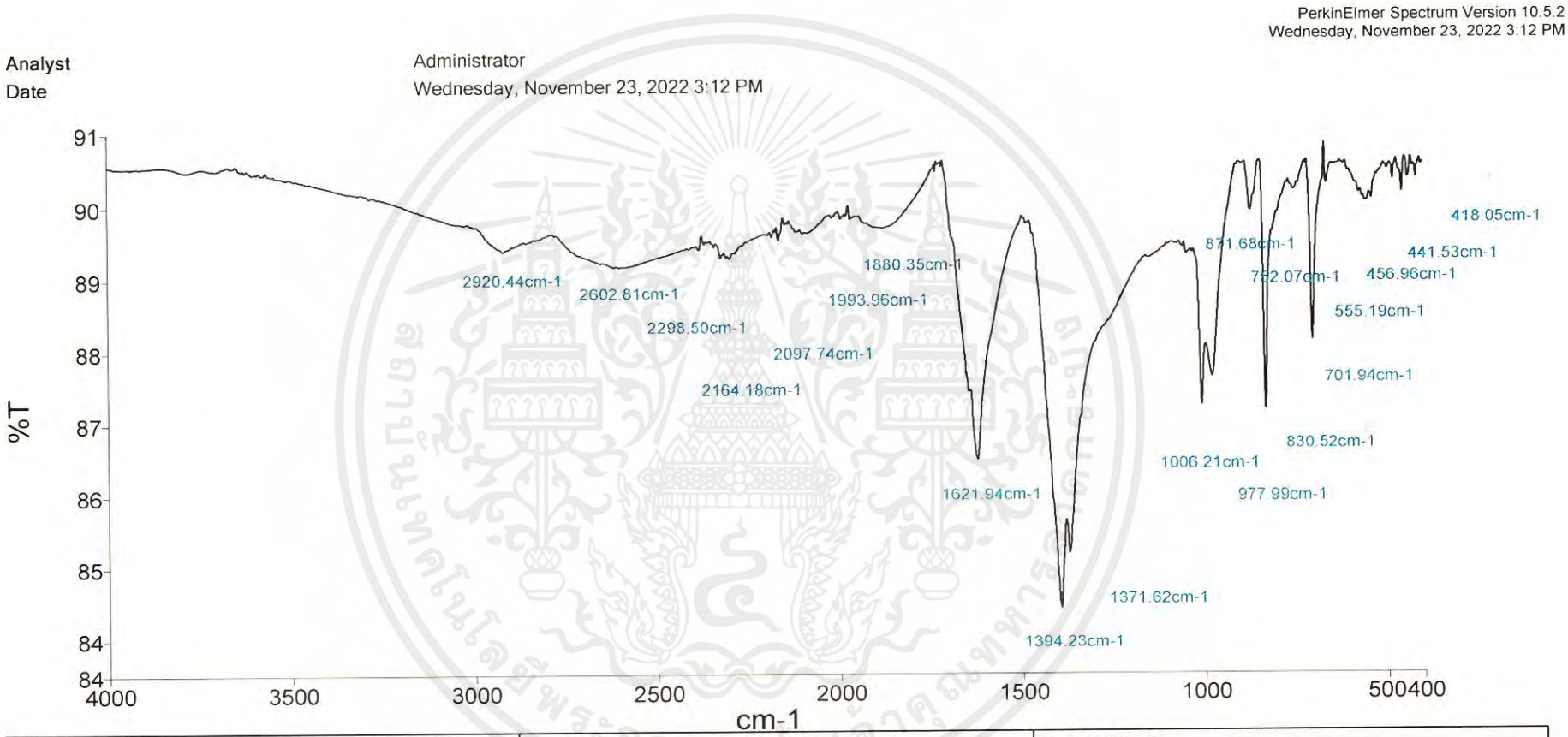
Sample Name	Description	Quality Checks
SBC-500_1	Sample 082 By Administrator Date Wednesday, November 23 2022	The Quality Checks give rise to multiple warnings for the sample.

รูปที่ ง.6 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทางานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ท าจากเปลือกสละ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 ℃



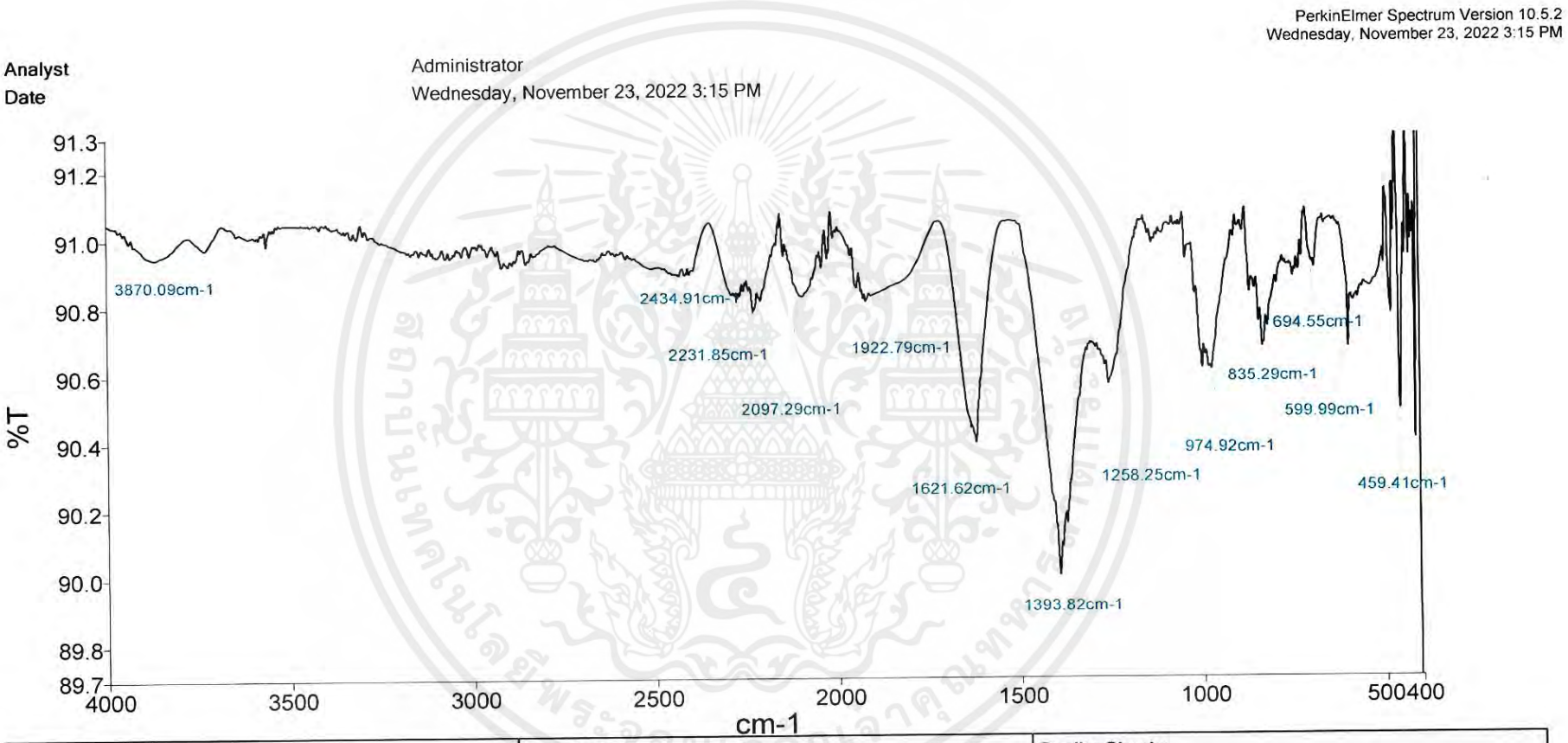
Sample Name	Description	Quality Checks
SBC-700_1	Sample 085 By Administrator Date Wednesday, November 23 2022	The Quality Checks give rise to multiple warnings for the sample.

รูปที่ ง.7 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกมะนาว – ส้มจี๊ด ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C



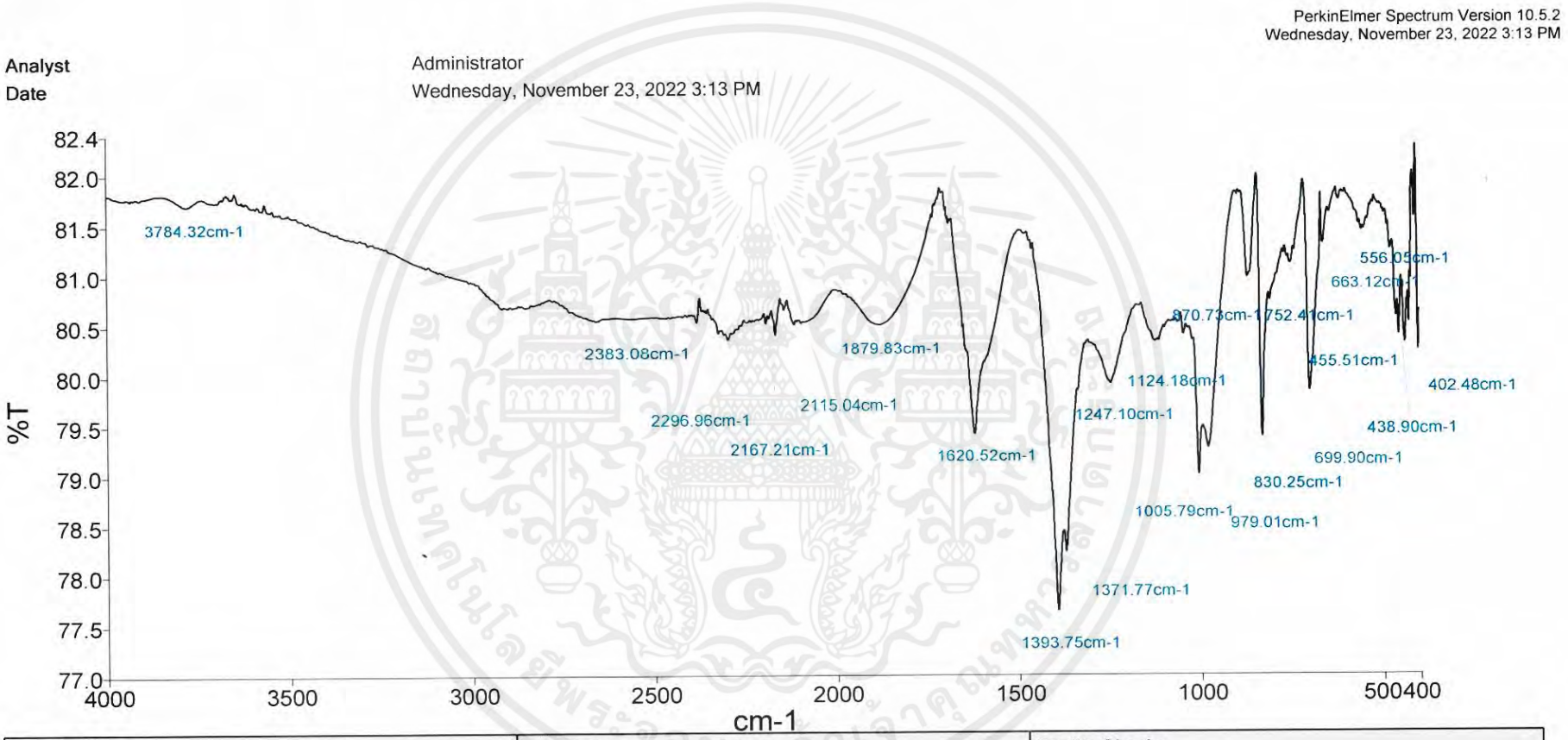
Sample Name	Description	Quality Checks
LKBC-500_1	Sample 091 By Administrator Date Wednesday, November 23 2022	The Quality Checks give rise to a Weak Bands warning for the sample.

รูปที่ ง.8 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกมะนาว – ส้มจี๊ด ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C



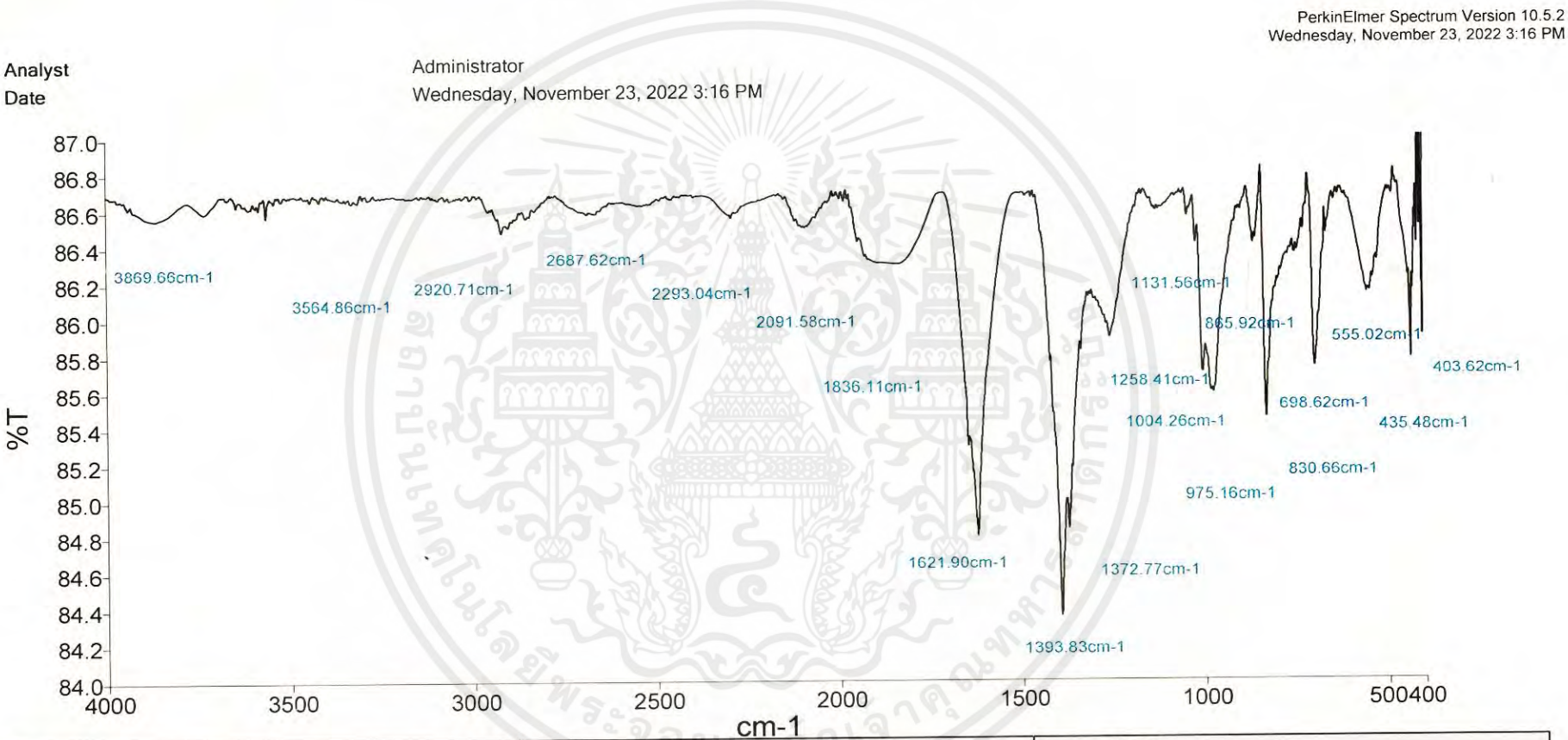
Sample Name	Description	Quality Checks
LKBC-700_1	Sample 094 By Administrator Date Wednesday, November 23 2022	The Quality Checks give rise to a Weak Bands warning for the sample.

รูปที่ ง.9 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกมะนาว – สละ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C



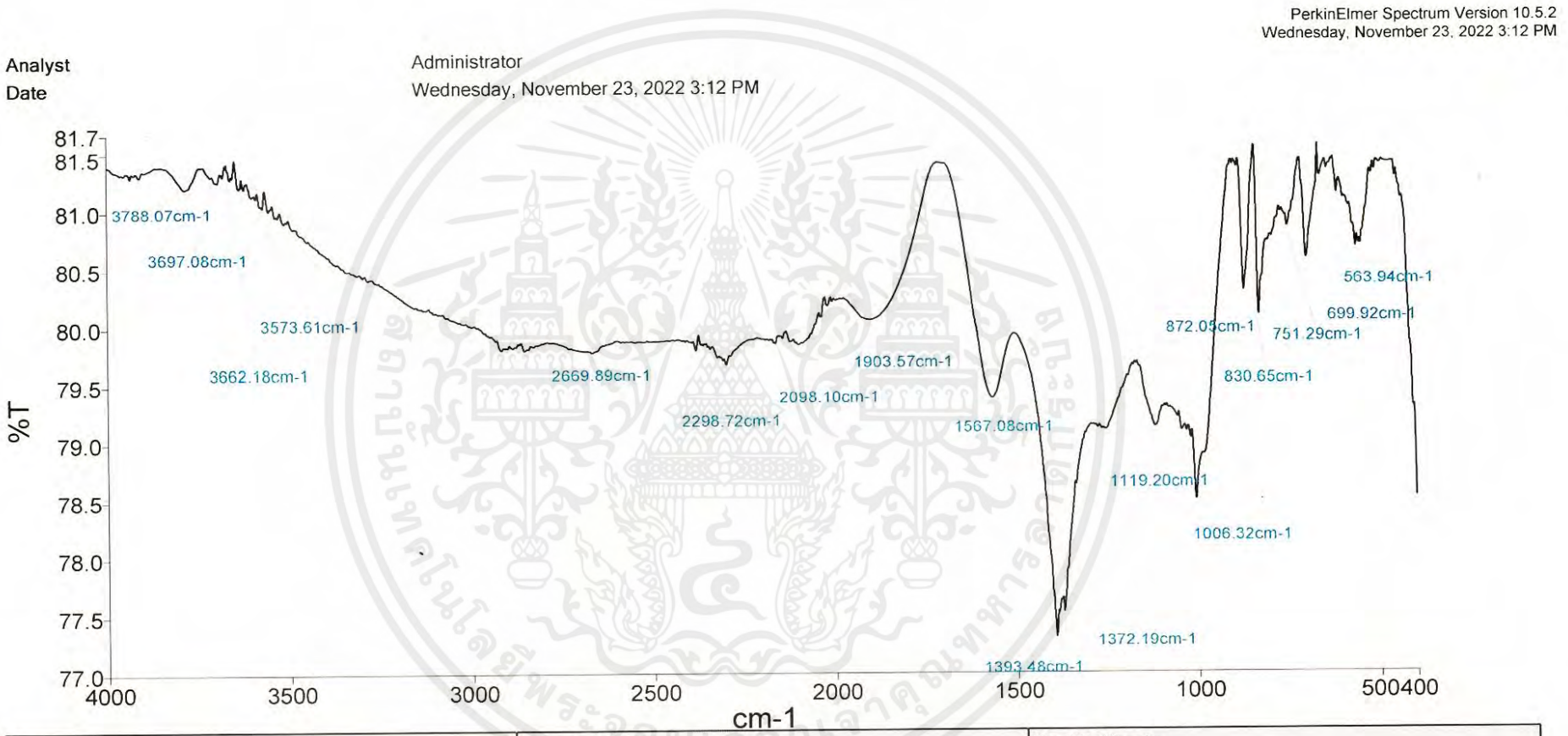
Sample Name	Description	Quality Checks
LSBC-500_1	Sample 092 By Administrator Date Wednesday, November 23 2022	The Quality Checks give rise to a Weak Bands warning for the sample.

รูปที่ ง.10 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกมะนาว – สละ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C



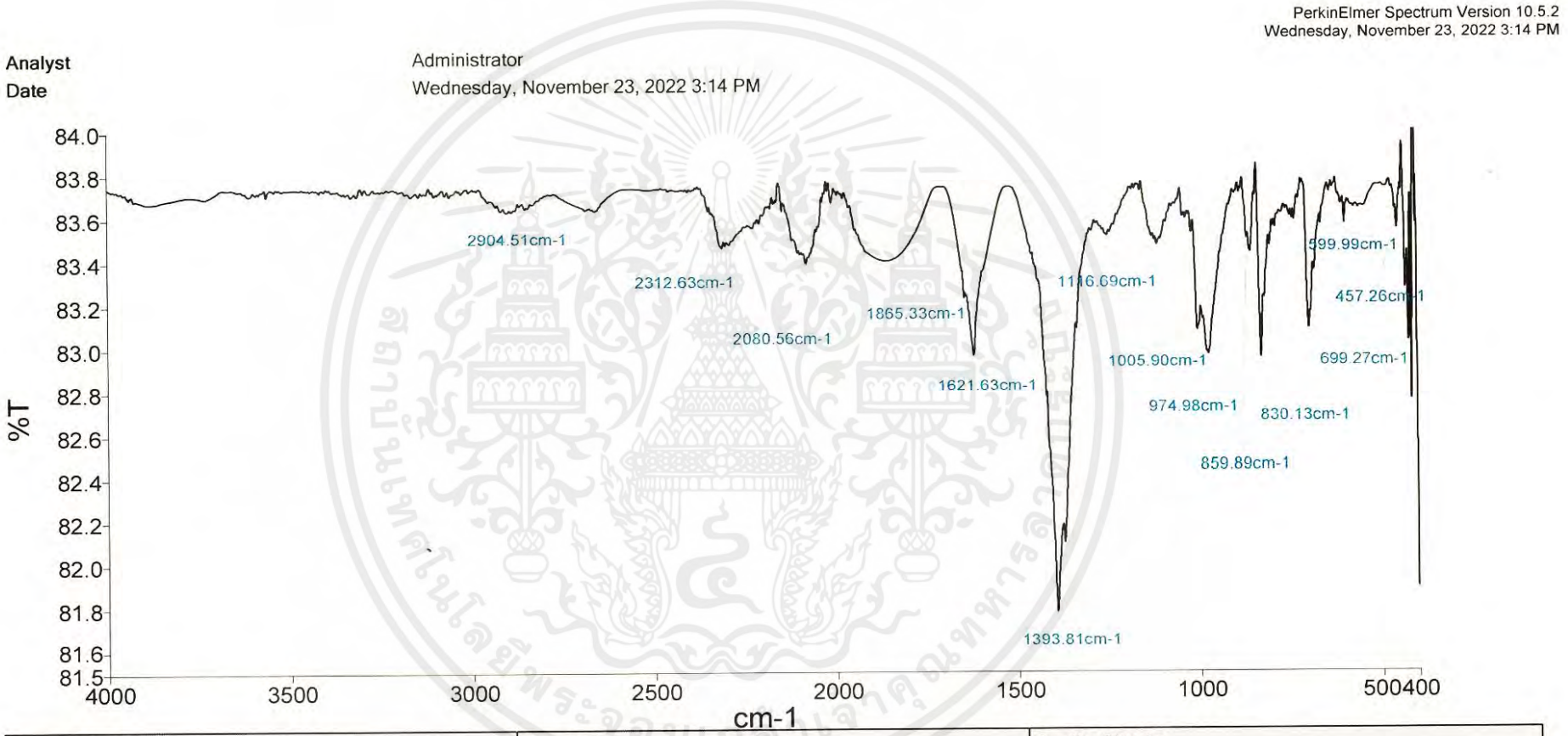
Sample Name	Description	Quality Checks
LSBC-700_1	Sample 095 By Administrator Date Wednesday, November 23 2022	The Quality Checks give rise to multiple warnings for the sample.

รูปที่ ง.11 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกส้มจี๊ด –สละ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C



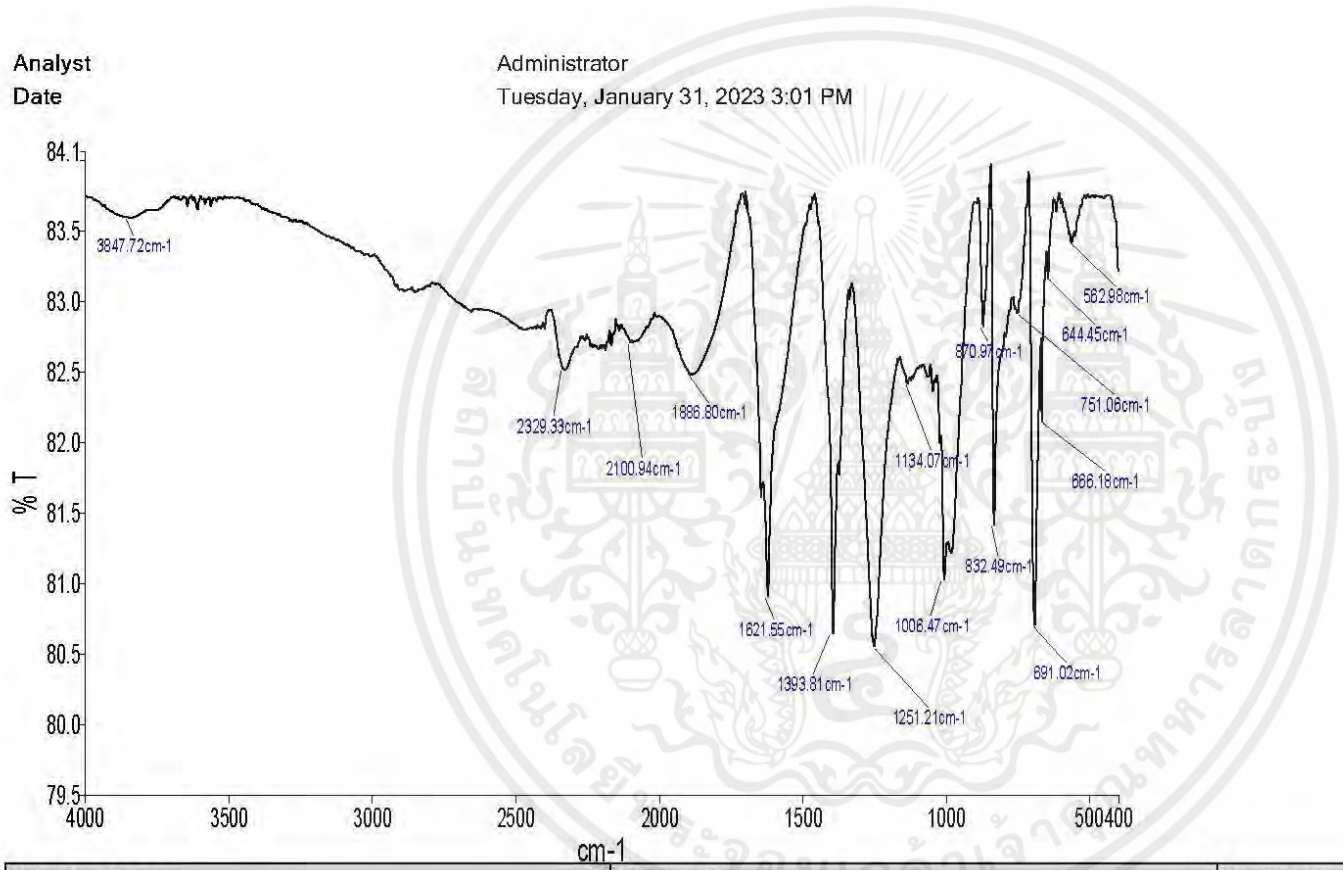
Sample Name	Description	Quality Checks
KSBC-500_1	Sample 090 By Administrator Date Wednesday, November 23 2022	The Quality Checks give rise to multiple warnings for the sample.

รูปที่ ง.12 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกส้มจี๊ด –สละ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C



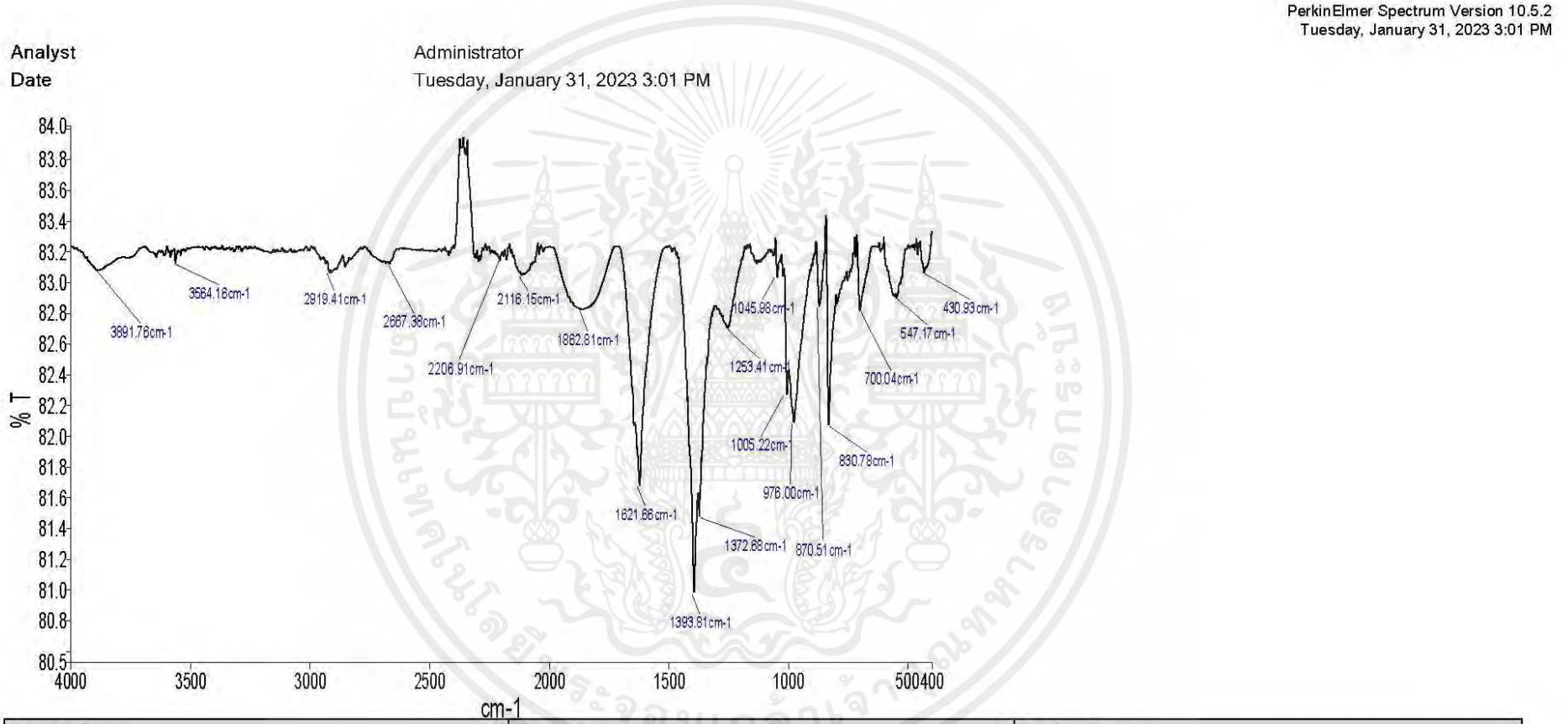
Sample Name	Description	Quality Checks
KSBC-700_1	Sample 093 By Administrator Date Wednesday, November 23 2022	The Quality Checks give rise to a Weak Bands warning for the sample.

รูปที่ ง.13 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกมะนาว – ส้มจี๊ด –สละ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C



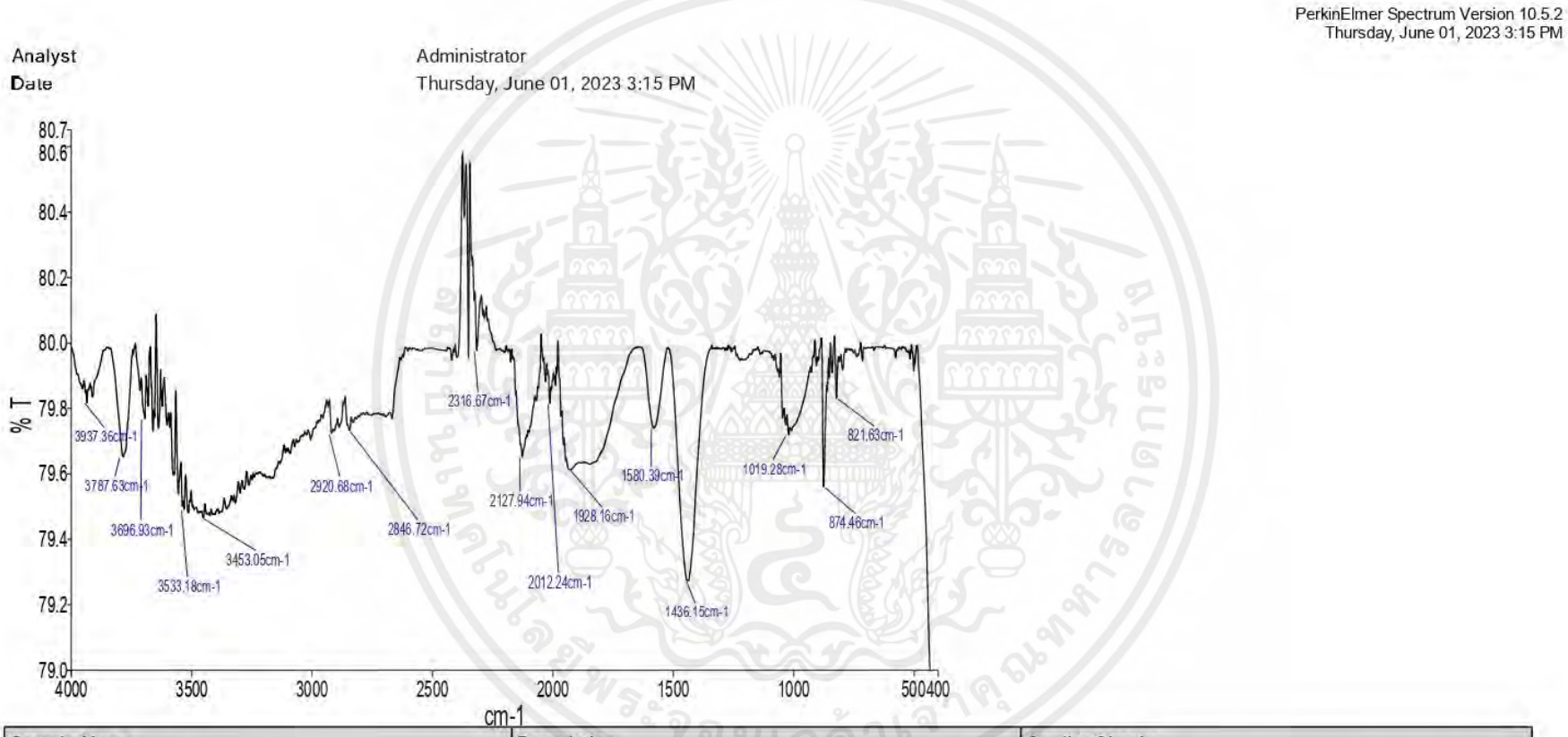
Sample Name	Description	Quality Checks
LKSBC-500_1	Sample 095 By Administrator Date Tuesday, January 31 2023	The Quality Checks give rise to a Weak Bands warning for the sample.

รูปที่ ง.14 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกมะนาว – ส้มจี๊ด –สละ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C



Sample Name	Description	Quality Checks
LKSBC-700_1	Sample 096 By Administrator Date Tuesday, January 31 2023	The Quality Checks give rise to multiple warnings for the sample.

รูปที่ ง.15 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันการทำงานบนพื้นผิวของไบโอชาร์หลังการดูดซับเมทิลีนบลูของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกมะนาว – ส้มจี๊ด – สละ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 °C



Sample Name	Description	Quality Checks
LKSBC-700_1	Sample 084 By Administrator Date Thursday, June 01 2023	The Quality Checks give rise to multiple warnings for the sample.

ภาคผนวก จ

ผลการวิเคราะห์การดูดซับเมทิลีนบลูของไบโอชาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.1 ผลการวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของเมทิลีนบลูก่อน-หลังการดูดซับด้วยไบโอชาร์

Sample	Initial MB concentration C_0 (ppm)	Methylene blue absorbance					MB concentration after adsorption C (ppm)
		n_1	n_2	n_3	Avg	SD	
LB500	10	0.7127	0.7133	0.7050	0.7103	0.0046	6.1639
LB700	10	0.5660	0.5699	0.5565	0.5641	0.0069	4.9448
KB500	10	0.7368	0.7364	0.7335	0.7356	0.0018	6.3743
KB700	10	0.6862	0.6892	0.7061	0.6938	0.0107	6.0263
SB500	10	0.4861	0.4856	0.4750	0.4822	0.0063	4.2618
SB700	10	0.5625	0.5606	0.5651	0.5627	0.0023	4.9331
LKB500	10	0.8066	0.8067	0.7920	0.8018	0.0085	6.9264
LKB700	10	0.7128	0.7101	0.7112	0.7114	0.0014	6.1725
LSB500	10	0.5405	0.5350	0.5217	0.5324	0.0097	4.6802
LSB700	10	0.3392	0.3392	0.3242	0.3342	0.0087	3.0274
KSB500	10	0.5437	0.5267	0.5206	0.5303	0.0120	4.6629
KSB700	10	0.4909	0.4823	0.4643	0.4792	0.0136	4.2363
LKSB500	10	0.6039	0.5906	0.5784	0.5910	0.0128	5.1686
LKSB700	10	0.2909	0.2998	0.2877	0.2928	0.0063	2.6822

n_1, n_2, n_3 คือ การทดลองครั้งที่ 1, การทดลองครั้งที่ 2 และการทดลองครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.2 ผลการวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพการดูดซับเมทีลีนบลูของไบโอชาร์

Sample	Initial MB concentration C_0 (ppm)	MB concentration after adsorption C (ppm)	Adsorption efficiency (%)
LB500	10	6.1639	38.3607
LB700	10	4.9448	50.5520
KB500	10	6.3743	36.2566
KB700	10	6.0263	39.7366
SB500	10	4.2618	57.3815
SB700	10	4.9331	50.6688
LKB500	10	6.9264	30.7363
LKB700	10	6.1725	38.2746
LSB500	10	4.6802	53.1982
LSB700	10	3.0274	69.7257
KSB500	10	4.6629	53.3706
KSB700	10	4.2363	57.6373
LKSB500	10	5.1686	48.3145
LKSB700	10	2.6822	73.1780

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.3 ผลการวิเคราะห์ค่าความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูของไบโอชาร์

Sample	Initial MB concentration C_0 (ppm)	MB concentration after adsorption C (ppm)	MB volume use in the adsorption V_{sol} (L)	Mass of adsorbent M_{ads} (g)	Adsorption Capacity (mg/g)
LB500	10	6.1639	0.015	0.015	3.8361
LB700	10	4.9448	0.015	0.015	5.0552
KB500	10	6.3743	0.015	0.015	3.6257
KB700	10	6.0263	0.015	0.015	3.9737
SB500	10	4.2618	0.015	0.015	5.7382
SB700	10	4.9331	0.015	0.015	5.0669
LKB500	10	6.9264	0.015	0.015	3.0736
LKB700	10	6.1725	0.015	0.015	3.8275
LSB500	10	4.6802	0.015	0.015	5.3198
LSB700	10	3.0274	0.015	0.015	6.9726
KSB500	10	4.6629	0.015	0.015	5.3371
KSB700	10	4.2363	0.015	0.015	5.7637
LKSB500	10	5.1686	0.015	0.015	4.8314
LKSB700	10	2.6822	0.015	0.015	7.3178

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.4 ผลการวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของเมทิลีนบลูก่อน-หลังการดูดซับด้วยไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกมะนาว - ส้มจี๊ด - สละ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700°C

Sample	Initial MB concentration (ppm)	Biochar concentration (g/L)	Methylene blue absorbance					MB concentration after adsorption (ppm)
			N_1	N_2	N_3	Avg	SD	
LKSB700 – 0.5	10	0.5	0.6223	0.6238	0.6172	0.6211	0.0035	5.4198
LKSB700 - 1	10	1	0.2909	0.2998	0.2877	0.2928	0.0063	2.6822
LKSB700 - 2	10	2	0.1373	0.1372	0.1318	0.1354	0.0031	1.3700
LKSB700 - 3	10	3	0.0741	0.0818	0.0762	0.0774	0.0040	0.8857
LKSB700 - 4	10	4	0.0581	0.0503	0.0550	0.0545	0.0039	0.6948

n_1, n_2, n_3 คือ การทดลองครั้งที่ 1, การทดลองครั้งที่ 2 และการทดลองครั้งที่ 3

ตารางที่ จ.5 ผลการวิเคราะห์ความสามารถและประสิทธิภาพในการดูดซับเมทีลีนบลูของไบโอชาร์ที่ทำจากเปลือกมะนาว - ส้มจี๊ด - สละ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700°C

Sample	Initial MB concentration (ppm)	Biochar concentration (g/L)	MB concentration after adsorption (ppm)	MB volume use in the adsorption (L)	Mass of adsorbent (g)	Adsorption Capacity (mg/g)	Adsorption efficiency (%)
LKSB700 – 0.5	10	0.5	5.4198	0.025	0.0125	9.1603	45.8017
LKSB700 - 1	10	1	2.6822	0.015	0.0150	7.3178	73.1780
LKSB700 - 2	10	2	1.3700	0.025	0.0500	4.3150	86.3005
LKSB700 - 3	10	3	0.8857	0.025	0.0750	3.0381	91.1425
LKSB700 - 4	10	4	0.6948	0.025	0.1000	2.3263	93.0521

ตารางที่ จ.6 ผลการวิเคราะห์ค่า pH ของสารละลายเมทิลีนบลูก่อนและหลังการดูดซับด้วยไบโอชาร์

Sample	Initial pH					pH after adsorption				
	n_1	n_2	n_3	Avg	SD	n_1	n_2	n_3	Avg	SD
LB500	6.03	6.06	5.84	5.98	0.12	8.05	8.06	8.11	8.07	0.03
LB700	5.81	5.94	5.84	5.86	0.07	8.37	8.44	8.47	8.43	0.05
KB500	5.99	5.87	5.82	5.89	0.09	9.00	8.99	9.01	9.00	0.01
KB700	5.94	5.93	5.85	5.91	0.05	8.09	8.10	8.12	8.10	0.02
SB500	6.00	6.03	5.96	6.00	0.04	8.49	8.51	8.46	8.49	0.03
SB700	5.97	5.90	5.91	5.93	0.04	7.95	8.01	8.03	8.00	0.04
LKB500	5.97	5.92	5.87	5.92	0.05	8.09	8.14	8.16	8.13	0.04
LKB700	5.95	5.91	5.88	5.91	0.04	8.25	8.21	8.24	8.23	0.02
LSB500	6.02	5.95	5.87	5.95	0.08	8.93	8.91	8.92	8.92	0.01
LSB700	6.04	5.94	5.89	5.96	0.08	9.37	9.40	9.42	9.40	0.03
KSB500	5.97	5.85	5.84	5.89	0.07	8.25	8.30	8.36	8.30	0.06
KSB700	5.90	5.87	5.89	5.89	0.02	8.68	8.70	8.72	8.70	0.02
LKSB500	6.04	5.94	5.89	5.96	0.08	8.43	8.39	8.45	8.42	0.03
LKSB700	6.02	5.96	5.97	5.98	0.03	9.09	9.10	9.11	9.10	0.01

n_1, n_2, n_3 คือ การทดลองครั้งที่ 1, การทดลองครั้งที่ 2 และการทดลองครั้งที่ 3

ประวัติผู้จัดทำ

ชื่อ – นามสกุล นายธราเทพ คำไทย

วัน เดือน ปีเกิด วันที่ 30 เมษายน พ.ศ. 2544

ภูมิลำเนา จังหวัดสุราษฎร์ธานี

ที่อยู่ 65 หมู่ 3 ตำบลบางสวรรค์ อำเภอพระแสง จังหวัดสุราษฎร์ธานี

ประวัติการศึกษา

- สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมต้น ปีการศึกษา 2558 จากจากโรงเรียนบางสวรรค์วิทยาคม
- สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมปลาย ปีการศึกษา 2561 จากโรงเรียนบางสวรรค์วิทยาคม
- สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต วศ.บ. (วิศวกรรมพลังงาน) ปีการศึกษา 2565 จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

ผลงานและกิจกรรม

- ผ่านการฝึกงานในส่วน Maintenance & Operation จากบริษัทบางสววรค์ กรีน จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้จัดทำ

ชื่อ – นามสกุล นางสาวพรชนก คำจันทร์

วัน เดือน ปีเกิด วันที่ 13 พฤศจิกายน พ.ศ. 2543

ภูมิลำเนา จังหวัดกรุงเทพมหานคร

ที่อยู่ 159/440 หมู่บ้านวิลล่ารามอินทรา ซ.คู้บอน 27 แยก 60 ถ.คู้บอน แขวงท่าแร้ง เขตบางเขน 10220 กทม.

ประวัติการศึกษา

- สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมต้น ปีการศึกษา 2558 จากโรงเรียนสารวิทยา
- สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ ปีการศึกษา 2561 จากโรงเรียนเตรียมวิศวกรรมศาสตร์ ไทย-เยอรมัน
- สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต วศ.บ. (วิศวกรรมพลังงาน) ปีการศึกษา 2565 จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

ผลงานและกิจกรรม

- ผ่านการฝึกงานในส่วน Maintenance & Operation จากบริษัท บางสวรรค์ กรีน จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้