

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปราย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสังเคราะห์ไบโอชาร์จากเหง้ามันสำปะหลังจากนั้นเลือกตัวแทนที่สังเคราะห์ได้ไปดัดแปลงด้วยโซเดียมซิลิเกต และกรดฟอสฟอริก เพื่อนำไปใช้ในการบำบัดเมธิล โดยไบโอชาร์ที่สังเคราะห์จากเหง้ามันสำปะหลังจะใช้ตัวย่อเป็น BCA ไบโอชาร์ที่สังเคราะห์จากเหง้ามันสำปะหลังที่ดัดแปลงด้วยโซเดียมซิลิเกตจะใช้ตัวย่อเป็น BNS และไบโอชาร์ที่สังเคราะห์จากเหง้ามันสำปะหลังที่ดัดแปลงด้วยกรดฟอสฟอริกจะใช้ตัวย่อเป็น BHP ดังนั้นผลการศึกษาจะประกอบไปด้วยผลการศึกษหลัก ๆ ได้แก่ ผลการศึกษาคุณลักษณะสมบัติของไบโอชาร์ และผลการศึกษาการบำบัดเมธิลด้วยไบโอชาร์ทั้งสามชนิด

4.1 ผลการศึกษาคุณลักษณะสมบัติของไบโอชาร์

จากการสังเคราะห์ไบโอชาร์จากเหง้ามันสำปะหลังทั้งหมด 15 ตัวอย่าง และนำไปวิเคราะห์คุณลักษณะสมบัติของไบโอชาร์ด้วยเทคนิคต่าง ๆ ได้แก่ เทคนิควิเคราะห์ธาตุ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ (CHNS) เทคนิคฟูเรียร์ทรานซฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FTIR) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เทคนิคการถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์สามมิติระดับจุลภาคด้วยเอกซเรย์อำนาจสูงจากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอน (XTM) เทคนิควิเคราะห์หาพื้นที่และความพรุนของอนุภาค (BET) เทคนิคการวิเคราะห์ค่าประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ (pH_{pzc}) ซึ่งจะเลือกตัวแทนไบโอชาร์ที่มีความเหมาะสมที่สุด จากเปอร์เซ็นต์คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอน ด้วยเทคนิค CHNS ส่วนเทคนิคอื่น ๆ จะนำมาใช้ในการอธิบายลักษณะด้านอื่น ๆ ของไบโอชาร์ที่ได้รับเลือก โดยการทดลองที่กล่าวมาจะมีผลการทดลองดังนี้

4.1.1 ลักษณะทางกายภาพของไบโอชาร์จากเหง้ามันสำปะหลัง



จากการสังเคราะห์ไบโอชาร์จากเหง้ามันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 0.5 1 1.5 2 และ 2.5 ชั่วโมง ที่ภายใต้สภาวะแก๊สไนโตรเจน โดยมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ คือ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที จะพบว่าลักษณะทางกายภาพของไบโอชาร์จะมีสีดังต่อไปนี้ เช่น สีน้ำตาล สีน้ำตาลผสมดำ สีดำสนิท โดยจะมีลักษณะกายภาพดังตารางที่ 4.1

4.1.1.1 ลักษณะทางกายภาพของไบโอชาร์

จากการสังเคราะห์ไบโอชาร์จากเหง้ามันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0.5 1 1.5 2 และ 2.5 ชั่วโมง ที่ภายใต้สภาวะแก๊สไนโตรเจนโดยมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ คือ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่าลักษณะทางกายภาพของไบโอชาร์ มีสีค่อนข้างเป็นสีน้ำตาล และสีน้ำตาลผสมดำจึงสันนิษฐานว่ามีการเผาไหม้ที่ยังไม่สมบูรณ์ ดังนั้น

จึงไม่เลือกตัวอย่างที่สังเคราะห์จากอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสไปศึกษาต่อ สำหรับการสังเคราะห์ไบโอชาร์จากเห้ง้ำมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 0.5 1 1.5 2 และ 2.5 ชั่วโมง ที่ภายใต้สภาวะแก๊สไนโตรเจนโดยมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่าลักษณะทางกายภาพของไบโอชาร์ที่เวลา 0.5 ถึง 1.5 ชั่วโมง จะมีลักษณะของสีค่อนข้างเป็นสีน้ำตาล ผสมดำจึงสันนิษฐานว่ามีการเผาไหม้ที่ยังไม่สมบูรณ์จึงไม่นำไปศึกษาต่อ แต่ลักษณะทางกายภาพของไบโอชาร์ที่เวลา 2 ถึง 2.5 ชั่วโมง มีสีที่ดำสนิทจึงสันนิษฐานว่ามีการกลายเป็นไบโอชาร์ที่สมบูรณ์จึงจะนำไปศึกษาต่อ และจากการสังเคราะห์ไบโอชาร์จากเห้ง้ำมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0.5 1 1.5 2 และ 2.5 ชั่วโมง ที่ภายใต้สภาวะแก๊สไนโตรเจนโดยมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ คือ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที และพบว่าลักษณะทางกายภาพของไบโอชาร์ที่เวลา 0.5 ถึง 2.5 ชั่วโมง มีสีที่ดำสนิทจึงสันนิษฐานว่ามีการกลายเป็นไบโอชาร์ที่สมบูรณ์จึงนำไปศึกษาต่อ โดยนำตัวอย่างที่ถูกคัดเลือกทั้งหมด 7 ตัวอย่าง ประกอบด้วย ไบโอชาร์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส 2 ตัวอย่าง คือไบโอชาร์ที่ใช้เวลาไพโรไลซิส 2 ชั่วโมง และ 2.5 ชั่วโมง และไบโอชาร์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส 5 ตัวอย่าง คือไบโอชาร์ที่ใช้เวลาไพโรไลซิส 0.5 1 1.5 2 และ 2.5 ชั่วโมง ไปศึกษาด้วยเทคนิค CHNS เพื่อวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบต่อไป

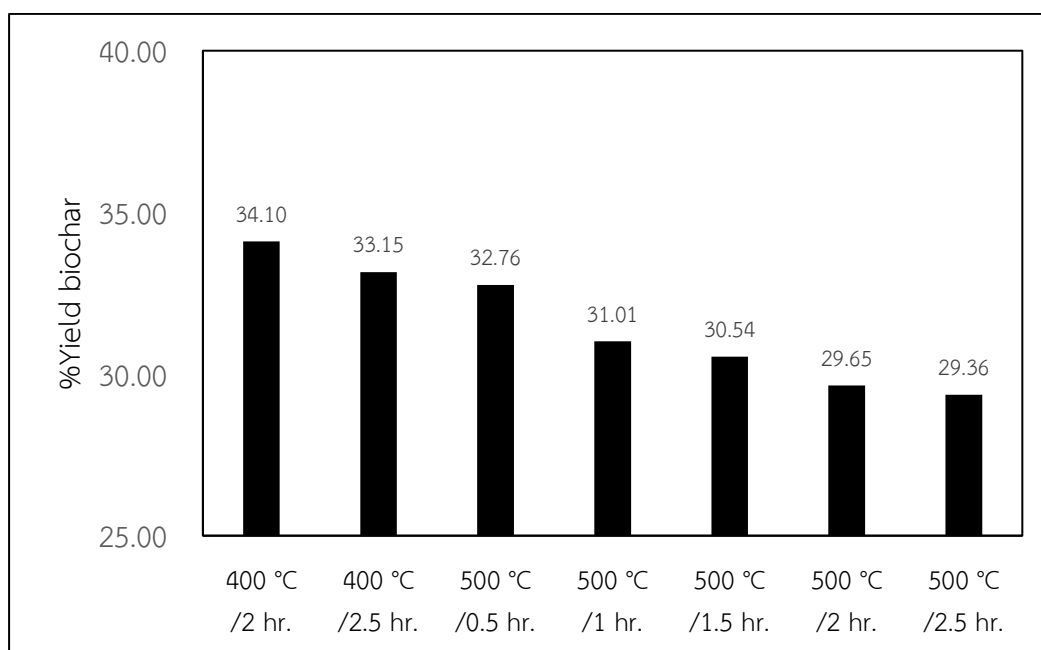
ตารางที่ 4.1 ลักษณะรูปทางกายภาพการสังเคราะห์ไบโอชาร์จากเหง้ามันสำปะหลังที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ตัวอย่าง	300 °C	400 °C	500 °C
0.5 ชั่วโมง			
1 ชั่วโมง			
1.5 ชั่วโมง			
2 ชั่วโมง			
2.5 ชั่วโมง			

4.1.2 เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของไบโอชาร์ (Biochar Yield %)

จากการสังเคราะห์ไบโอชาร์จากเหง้ามันสำปะหลังที่ถูกคัดเลือกทั้งหมด 7 ตัวอย่าง ประกอบด้วย ไบโอชาร์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส 2 ตัวอย่าง คือไบโอชาร์ที่ใช้เวลาไพโรไลซิส 2 และ 2.5 ชั่วโมง ไบโอชาร์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส 5 ตัวอย่าง คือไบโอชาร์ที่ใช้เวลาไพโรไลซิส 0.5 1 1.5 2 และ 2.5 ชั่วโมง ดังรูปที่ 4.1 ผลของเปอร์เซ็นต์ผลผลิตไบโอชาร์ที่ได้หลังจากกระบวนการไพโรไลซิส พบว่าเมื่ออุณหภูมิการไพโรไลซิสเพิ่มขึ้นจาก 400 องศาเซลเซียส ไปเป็น 500 องศาเซลเซียส ที่เวลาระยะไพโรไลซิส 2.5 ชั่วโมงเท่ากัน เปอร์เซ็นต์ของผลผลิตไบโอชาร์จะมีค่าที่ลดลงจาก 33.15 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 29.36 เปอร์เซ็นต์ และที่อุณหภูมิเดียวกัน 500 องศาเซลเซียส แต่มีการเพิ่มระยะเวลาในการไพโรไลซิสจาก 0.5 ชั่วโมงไปเป็น 2.5 ชั่วโมง จะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ของผลผลิตไบโอชาร์ลดลงจาก 32.76 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 29.36 เปอร์เซ็นต์ นั่นหมายความว่า

ทั้งอุณหภูมิและระยะเวลาในการไพโรไลซิสจะส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของไบโอชาร์ที่ได้ ซึ่งผลการศึกษาเหมือนกับ Sun et al., 2017 ที่ระบุไว้ว่าการเพิ่มระยะเวลาในการไพโรไลซิสทำให้ปริมาณไบโอชาร์ลดลง เนื่องจากสารอินทรีย์ถูกสลายอย่างต่อเนื่อง และเมื่อเวลาผ่านไปถึงจุดหนึ่ง การลดลงของเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของไบโอชาร์จะชะลอตัวแสดงว่ากระบวนการไพโรไลซิสได้ถึงจุดสมดุลแล้ว แต่เมื่อใช้อุณหภูมิในการไพโรไลซิสที่สูงขึ้น การเพิ่มระยะเวลาในการไพโรไลซิสจะไม่มีผลต่อปริมาณไบโอชาร์มากนัก



รูปที่ 4.1 เปอร์เซนต์ผลผลิตของไบโอชาร์จากเหง้ามันสำปะหลังที่ไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 400 และ 500 องศาเซลเซียส และควบคุมระยะเวลาในการไพโรไลซิสที่ 0.5 1 1.5 2 และ 2.5 ชั่วโมง

4.1.3 เทคนิค วิเคราะห์ธาตุ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ (CHNS)

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค CHNS เป็นเทคนิคที่ใช้ในการระบุธาตุที่เป็นองค์ประกอบ โดยสามารถระบุปริมาณของคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ไนโตรเจน (N) ที่อยู่ในตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ได้ จากเทคนิคดังกล่าวสามารถระบุสัดส่วน คาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนได้ดังตารางที่ 4.2 และแสดงปริมาณธาตุองค์ประกอบของไบโอชาร์ เพื่อนำไปอธิบายการคัดเลือกไบโอชาร์จากมาตรฐานของ European Biochar Certificate first publication March 2012 : EBC 2012

ตารางที่ 4.2 ปริมาณธาตุองค์ประกอบของไบโอชาร์

ตัวอย่าง	Elemental composition (%)			Ratio H/C
	Carbon%	Hydrogen%	Nitrogen %	
1. Biochar 400 °C / 2.0 hr.	73.0770	4.2161	1.9140	0.0577
2. Biochar 400 °C / 2.5 hr.	75.1320	3.7878	1.7910	0.0504
3. Biochar 500 °C / 0.5 hr.	73.5960	2.7655	0.9163	0.0376
4. Biochar 500 °C / 1.0 hr.	73.7490	2.5642	0.9088	0.0348
5. Biochar 500 °C / 1.5 hr.	74.0520	2.2551	0.9009	0.0305
6. Biochar 500 °C / 2.0 hr.	75.4010	2.1816	0.8830	0.0289
7. Biochar 500 °C / 2.5 hr.	78.1490	2.0398	0.6919	0.0261

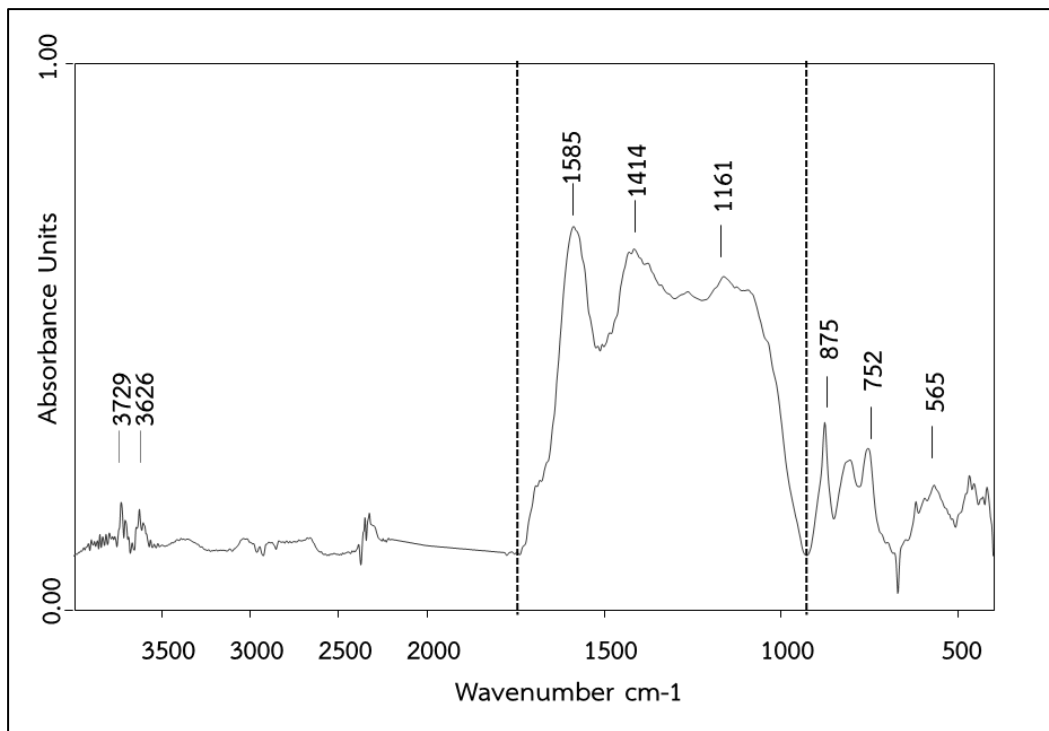
จากตารางที่ 4.2 สามารถอธิบายสัดส่วน คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ของไบโอชาร์ ได้ดังนี้ ไบโอชาร์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส และมีการเพิ่มระยะเวลาในการไพโรไลซิส จาก 2 ชั่วโมงเป็น 2.5 ชั่วโมง ปริมาณคาร์บอนสูงสุดของไบโอชาร์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส คือไบโอชาร์ที่ใช้ระยะเวลาในการไพโรไลซิส 2.5 ชั่วโมง สำหรับไบโอชาร์ที่มีปริมาณ คาร์บอนสูงสุดของไบโอชาร์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส คือไบโอชาร์ที่ใช้ระยะเวลา ในการไพโรไลซิส 2.5 ชั่วโมง ซึ่งจะเห็นได้ว่าไบโอชาร์ที่มีการใช้ระยะเวลาไพโรไลซิสเท่ากันที่ 2.5 ชั่วโมง แต่อุณหภูมิแตกต่างกัน ไบโอชาร์ที่ใช้อุณหภูมิที่สูงกว่าคือ 500 องศาเซลเซียส จะมีปริมาณ คาร์บอนที่เพิ่มขึ้น แต่ปริมาณไฮโดรเจน ไนโตรเจน และอัตราสัดส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนจะลดลง ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของไบโอชาร์เกิดขึ้นจากอุณหภูมิในการไพโรไลซิส เมื่ออุณหภูมิ การไพโรไลซิสเพิ่มขึ้นปริมาณคาร์บอนในไบโอชาร์จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการกำจัดสารระเหย (Volatile matter) และองค์ประกอบที่เป็นออกซิเจน และไฮโดรเจนในรูปของก๊าซ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และไอน้ำ (H₂O) กระบวนการนี้ทำให้ปริมาณ ของคาร์บอนในโครงสร้างไบโอชาร์เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับองค์ประกอบอื่น ๆ (Khater et al., 2024) นั่นหมายความว่า อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะช่วยกำจัดสารระเหยออกไป ซึ่งจะสอดคล้องกับผล ของเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของไบโอชาร์ที่เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิจะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของไบโอชาร์ ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ อุณหภูมิที่สูงขึ้นยังทำให้ไบโอชาร์มีคาร์บอนที่เสถียรมีความคงตัว สูงขึ้น และเกิดการสร้างโครงสร้างที่มีวงอะโรมาติก ซึ่งมีลักษณะเป็นโครงสร้างวงแหวนของอะตอม

คาร์บอนที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะคู่ที่สลับกับพันธะเดี่ยว การเกิดโครงสร้างอะโรมาติก หมายถึง การที่ไบโอซาร์จะมีความคงทนต่อการย่อยสลาย และจะมีความเสถียรสูง ส่วนปริมาณของไฮโดรเจน จะลดลงเมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการไพโรไลซิสเพิ่มขึ้น ซึ่งจะเกิดจากจากสลายตัวของน้ำ และการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบมากขึ้นของคาร์บอนในสารประกอบอะโรมาติกในส่วนประกอบ ของชีวมวลส่งผลให้อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนลดลงตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้น ของความเสถียรทางเคมีของไบโอซาร์ เนื่องจากสารประกอบที่ประกอบด้วยไฮโดรเจนและไนโตรเจน ส่วนใหญ่ถูกสลายตัวออกไปแล้ว นั้นหมายความว่าอุณหภูมิการไพโรไลซิสเป็นปัจจัยที่สำคัญ ต่อคุณสมบัติของไบโอซาร์ (Wijitkosum & Jiwonok, 2019; Khater et al., 2024)

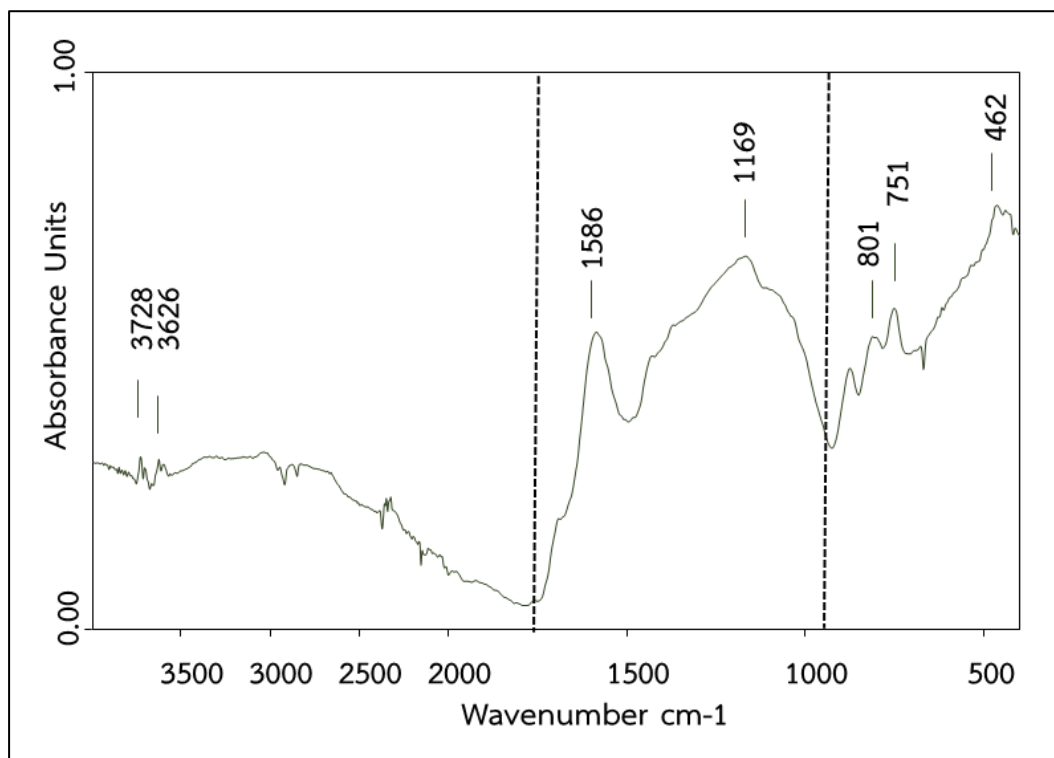
จากตารางที่ 4.2 พบว่าไบโอซาร์ทั้ง 7 ตัวอย่าง มีคุณสมบัติผ่านเกณฑ์ของ EBC 2012 โดยกำหนดปริมาณคาร์บอนของไบโอซาร์ต้องมีปริมาณคาร์บอนทั้งหมดอย่างน้อย 50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจากตารางที่ 4.2 พบว่าไบโอซาร์ทุกตัวอย่างมีปริมาณคาร์บอนในช่วง 73.0770 ถึง 78.1490 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด แสดงถึงความสามารถในการกักเก็บคาร์บอนที่ดี และอัตรา สัดส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนของ EBC 2012 กำหนดให้ปริมาณอัตราสัดส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอน ต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.7 ซึ่งอัตราสัดส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนจากการสังเคราะห์อยู่ในช่วง 0.0261 ถึง 0.0577 ซึ่งต่ำกว่าค่าที่กำหนด แสดงให้เห็นว่าไบโอซาร์จากการสังเคราะห์มีเสถียรภาพ ทางเคมีสูง และเหมาะสมสำหรับการใช้งาน เพราะฉะนั้นจะทำการคัดเลือกไบโอซาร์จากปริมาณ คาร์บอนที่สูงที่สุด และอัตราสัดส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนที่ต่ำที่สุด คือไบโอซาร์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 2.5 ชั่วโมง เนื่องจากงานวิจัย Wijitkosum, S., & Jiwonok, P., 2019 ระบุว่าไบโอซาร์ที่มีคุณภาพที่ดีและมีความเสถียรจะมีปริมาณคาร์บอนที่สูง นอกจากนี้อัตราสัดส่วน ไฮโดรเจนต่อคาร์บอนที่ต่ำบ่งชี้ถึงโครงสร้างอะโรมาติกที่สูงขึ้น และอัตราสัดส่วนไฮโดรเจน ต่อคาร์บอนที่ต่ำ เป็นตัวชี้วัดของความคงทนของไบโอซาร์ต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์และสารเคมี (Varjani, S., Kumar, G., & Rene, E. R., 2019) และงานวิจัยของ Mimmo et al., 2014 ระบุว่า ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิส และระดับความเป็นอะโรมาติกของไบโอซาร์ พบว่าเมื่ออุณหภูมิการไพโรไลซิสเพิ่มขึ้น ค่าอัตราสัดส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนจะลดลง และเกิด การเพิ่มขึ้นของโครงสร้างอะโรมาติก ซึ่งส่งผลให้ความเสถียรของไบโอซาร์เพิ่มขึ้นและมีความสามารถ ในการดูดซับสารมลพิษมากขึ้น

4.1.4 เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FTIR)

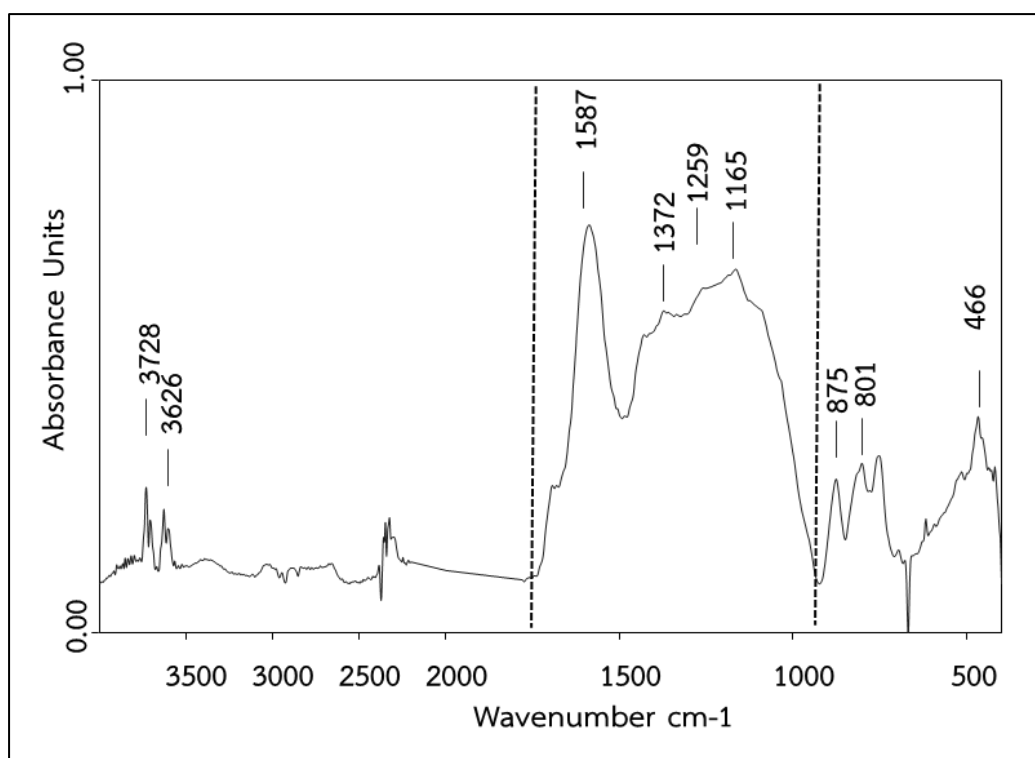
เป็นวิธีการวิเคราะห์ที่ใช้ในการศึกษา และระบุสมบัติทางเคมีของวัสดุ โดยการ ตรวจวัดการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของตัวอย่าง FTIR สามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างทางโมเลกุล และการปรากฏตัวของกลุ่มฟังก์ชันต่าง ๆ ในไบโอซาร์ได้ สำหรับผลของ FTIR ได้ทำการเปรียบเทียบ ลักษณะสเปกตรัม ของ BCA BNS และ BHP ดังรูปที่ 4.2 4.3 และ 4.4



รูปที่ 4.2 รูปแบบ FTIR bands ของ BCA



รูปที่ 4.3 รูปแบบ FTIR bands ของ BNS



รูปที่ 4.4 รูปแบบ FTIR bands ของ BHP

จากรูปที่ 4.2 จะพบว่า spectrum ของ BCA จะพบ band ที่ประมาณ 3729 cm^{-1} 3626 cm^{-1} พบพันธะ O-H Stretching Band ที่ประมาณ 1585 cm^{-1} พบพันธะ Aromatic C=C Stretching Band ที่ประมาณ 1414 cm^{-1} พบพันธะ -CH₂ Bending Band ที่ประมาณ 1116 cm^{-1} พบพันธะ C-O Stretching Band ที่ประมาณ 875 cm^{-1} 801 cm^{-1} 466 cm^{-1} พบ Substituent of Aromatic Rings ซึ่งสอดคล้องกับ Aup-Ngoen & Noipitak., 2020 ที่กล่าวว่าการปรากฏตัวของ O-H Stretching บ่งชี้ถึงหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนที่เหลืออยู่จากการไพโรไลซิสเนื่องจากกระบวนการนี้จะทำให้เกิดปฏิกิริยาการขจัดน้ำในชีวมวลส่งผลให้เกิดการลดลงของกลุ่มไฮดรอกซิลที่มีพันธะไฮโดรเจน ส่วนพันธะ aromatic C=C stretching บ่งชี้ถึงโครงสร้างอะโรมาติกในลิกนิน พันธะ -CH₂ Bending บ่งชี้โครงสร้างของเซลลูโลสหรือเอมิเซลลูโลส พันธะ C-O Stretching บ่งชี้ถึงการสั่นแบบยืดของพันธะ C-O ในโครงสร้างเซลลูโลสหรือเอมิเซลลูโลส ดังตารางที่ 4.3

จากรูปที่ 4.3 จะพบว่า spectrum ของ BNS จะพบ band ประมาณ 3728 cm^{-1} 3626 cm^{-1} พบพันธะ O-H Stretching, Band ที่ประมาณ 1169 cm^{-1} พบพันธะ Si-O-Si Stretching, Band ที่ประมาณ 801 cm^{-1} 751 cm^{-1} พบพันธะ Si-O และ Si-OH, band ที่ประมาณ 462 cm^{-1} พบพันธะ Si-O-Si หรือ Si-O-C ซึ่งสอดคล้องกับงาน Sari, L., Shofiyani, A., & Sapar, A. (2024). ที่ระบุไว้ว่า หลังการดัดแปลงด้วยโซเดียมซิลิเกต แสดงให้เห็นถึงการเกิดหมู่ พันธะ Si-O-Si Stretching, พันธะ Si-O และ Si-OH, พันธะ Si-O-Si หรือ Si-O-C เพิ่มขึ้นจากโครงสร้างเดิม ซึ่งหมายถึงพื้นผิวของไบโอชาร์จะมีหมู่ฟังก์ชันที่มีพันธะไฮโดรเจน และพันธะซิลิกาเพิ่มขึ้น ดังตารางที่ 4.4 โดยหมู่ฟังก์ชันที่

เพิ่มขึ้นมาจากการดัดแปลงมาจากการนำไบโอซาร์จากเหง้ามันสำปะหลังที่ได้มาแช่ด้วยกรดไฮโดรคลอริก จากนั้นจึงเติมโซเดียมซิลิเกตเพื่อทำปฏิกิริยากับไบโอซาร์

จากรูปที่ 4.4 จะพบว่า Spectrum ของ BHP จะพบ Band ประมาณ 3728 cm^{-1} 3628 cm^{-1} พบพันธะ O-H Stretching, Band ที่ประมาณ 1587 cm^{-1} พบพันธะ C=C, Band ที่ประมาณ 1372–1165 cm^{-1} พบพันธะ P=O bond P-OH bond P-O-C bond Band ที่ประมาณ 875 cm^{-1} พบพันธะ C-H (Aromatic) และ 801-466 พบ Phosphate bond ซึ่งสอดคล้องกับ Peng et al., 2017 ที่ระบุว่าหลังการดัดแปลงด้วยกรดฟอสฟอริกแสดงให้เห็นถึงการเกิดหมู่ P=O bond, P-O-C, bond, P=OOH bond เพิ่มขึ้นจากโครงสร้างเดิม ซึ่งหมายถึงพื้นผิวของไบโอซาร์จะมีหมู่ฟังก์ชัน ฟอสเฟต และมีพันธะไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น เช่นพันธะ O-H C=O P=OOH ดังตารางที่ 4.5 โดยหมู่ฟังก์ชันที่เพิ่มขึ้นมาจากการดัดแปลงมาจากการนำไบโอซาร์จากเหง้ามันสำปะหลังที่ได้มาแช่ด้วยกรดฟอสฟอริกเพื่อทำปฏิกิริยากับไบโอซาร์

ตารางที่ 4.3 ลักษณะการสั่นสะเทือนและฟังก์ชันการทำงานไบโอซาร์จากเหง้ามันสำปะหลัง

ฟังก์ชัน	ผลการศึกษา	Aup-Ngoen & Noipitak, 2020	คำอธิบาย
	ตำแหน่งพีค (cm^{-1})	ตำแหน่งพีค (cm^{-1})	
-OH stretching	3729–3626	3338–3344	บ่งชี้ถึงหมู่ฟังก์ชัน ออกซิเจนที่เหลืออกอยู่
Aromatic C=C stretching	1585	1507–1638	ใกล้เคียงกัน บ่งชี้ถึง โครงสร้างอะโรมาติกใน ลิกนิน
-CH ₂ bending	1414	1418–1423	ใกล้เคียงกัน บ่งชี้ โครงสร้างของเซลลูโลส หรือเอมิเซลลูโลส
-C–O stretching	1161	1023–1246	การสั่นแบบยืดของพันธะ C–O ในโครงสร้าง เซลลูโลสหรือเอมิเซลลูโลส
Substituted aromatic group	752–565	592–923	บ่งชี้ถึงกลุ่มอะโรมาติก

ตารางที่ 4.4 ลักษณะการสั่นสะเทือนและฟังก์ชันการทำงานของไปโอซาร์จากเหง้ามันสำปะหลังที่มี การตัดแปลงด้วยไซเตียมซิลิเกต

ฟังก์ชัน	ผลการศึกษา	Sari, L., Shofiyani, A., & Sapar, A., 2024	คำอธิบาย
	ตำแหน่งพีค (ซม. ⁻¹)	ตำแหน่งพีค (ซม. ⁻¹)	
O-H Stretching	3728–3626	3444-3452	พบหมู่ไฮดรอกซิล (-OH)
C=C หรือ C=O (Aromatic ring)	1631–1586	1431-1429	การสั่นของพันธะคู่ในวงแหวนอะโรมาติกหรือหมู่คาร์บอนิล (C=O) ในโครงสร้างไปโอซาร์
Si-O-Si Stretching	1169–1079	1070-1024	การสั่นของพันธะ Si-O-Si ที่เกิดจากปรับปรุง
Si-O และ Si-OH	801–751	758-472	หมู่ฟังก์ชัน Si-O และ Si-OH ที่ช่วยเพิ่มจุดยึดจับบนพื้นผิวไปโอซาร์
Si-O-Si หรือ Si-O-C	462	472	หมู่ซิลิกา (Si-O-Si) และหมู่ซิลิกอน-คาร์บอน (Si-O-C) ที่เพิ่มขึ้นหลังการปรับปรุง

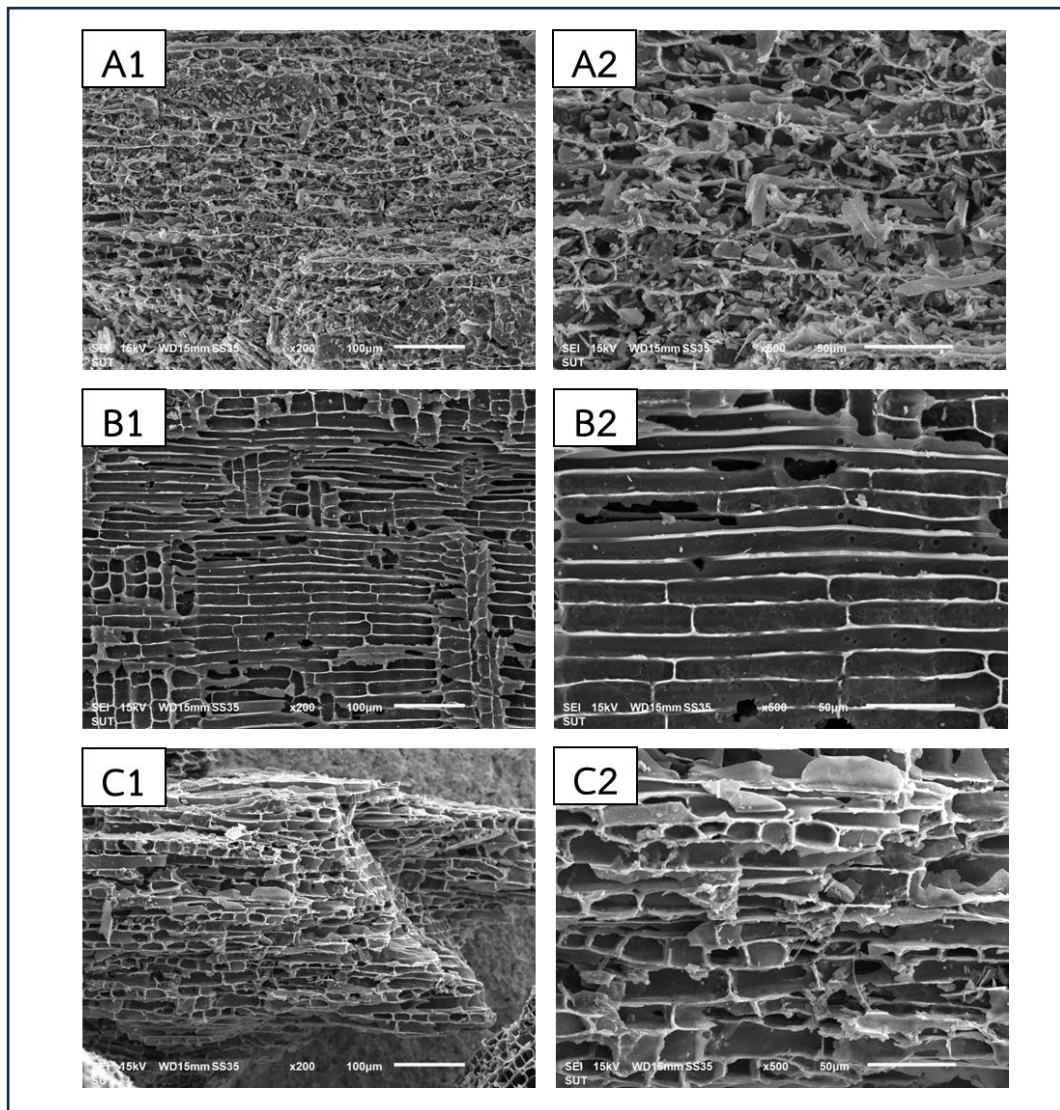
ตารางที่ 4.5 ลักษณะการสั่นสะเทือนและฟังก์ชันการทำงานของไบโอชาร์จากเหง้ามันสำปะหลังที่ดัดแปลงด้วยกรดฟอสฟอริก

ฟังก์ชัน	ผลการศึกษา	Peng et al., 2017	คำอธิบาย
	ตำแหน่งพีค (ซม. ⁻¹)	ตำแหน่งพีค (ซม. ⁻¹)	
O-H Stretching	3728-3628	3444	พบหมู่ไฮดรอกซิล (-OH)
C=C (Aromatic ring stretching)	1587	1616	พบโครงสร้างอะโรมาติกของไบโอชาร์
P=O, P-OH และ P-O-C (Phosphate-carbon bond)	1372-1165	1220-1070	พบหมู่ฟังก์ชันฟอสเฟต
C-H (Aromatic)	875	-	พบพันธะ C-H ในโครงสร้างอะโรมาติก
Phosphate bond	801-466	667	พบหมู่พันธะฟอสเฟต เช่น P-O-P

4.1.5 เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

จากการสังเคราะห์ BCA นำไปวิเคราะห์ลักษณะสมบัติด้วยเทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 200 เท่า และ 500 เท่า ดังรูปที่ 4.5 พบว่าลักษณะสัณฐานภายนอกของ BCA มีลักษณะเป็นผิวรูพรุนที่มีลักษณะการจัดเรียงกันอย่างไม่เป็นระเบียบ และเห็นโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นรูพรุน

แบบธรรมชาติจากกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส โดยรูพรุนเหล่านี้ถูกสร้างขึ้นเนื่องจากการสลายตัวขององค์ประกอบอินทรีย์ในเหง้ามันสำปะหลังตามรูปที่ A1 และ A2 และจากรูป B1 และ B2 เป็นรูปของ BNS พบว่าลักษณะพื้นผิวมีการพัฒนาในด้านการเรียงตัวของรูพรุนแบบเส้นตรง และมีรูพรุนเล็ก ๆ กระจายตัวทั่วพื้นผิว การดัดแปลงด้วยโซเดียมซิลิเกตทำให้เกิดการดัดแปลงโครงสร้างรูพรุน และมีการเพิ่มขึ้นพื้นที่ผิว ซึ่งจากรูปแบบของรูพรุนที่ปรากฏยังสะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างพื้นฐานของไบโอชาร์จากการดัดแปลงด้วยกรดไฮโดรคลอริกและโซเดียมซิลิเกต ซึ่งช่วยทำให้พื้นผิวมีความสะอาดมากกว่าไบโอชาร์ที่ไม่ได้มีการดัดแปลง และเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้าง ทำให้ไบโอชาร์ชนิดนี้มีประสิทธิภาพในระบบดูดซับที่ต้องการความคงทนสูงซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยอื่น ๆ พบว่าการดัดแปลงด้วยโซเดียมซิลิเกตส่งผลช่วยเสริมสร้างโครงสร้างที่มีความพรุน และเพิ่มพื้นที่ผิวผ่านการสร้างปฏิกิริยาเคมีระหว่างโซเดียมซิลิเกต และหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของไบโอชาร์ (GUO, Y., & Wang, Q., 2023) นอกจากนี้รูปที่ C1 และ C2 เป็นรูปของ BHP ที่กำลังขยาย 200X และ 500X จะเห็นได้ว่าลักษณะพื้นผิวของไบโอชาร์หลังจากการที่ดัดแปลงด้วยกรดฟอสฟอริก จะมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นจากโครงสร้างเดิม ซึ่งพื้นผิวมีความสะอาดมากกว่าไบโอชาร์ที่ไม่ได้มีการดัดแปลง เห็นรูพรุนและการพัฒนาโครงสร้าง ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างกรดฟอสฟอริก กับโครงสร้างคาร์บอนในไบโอชาร์ ขนาดรูพรุนลดลง และหมู่ฟังก์ชันฟอสเฟตที่เพิ่มเข้ามาในโครงสร้างช่วยเสริมแรงยึดเหนี่ยวกับสารที่มีขั้วไฟฟ้า (polar molecules) เช่น เมโรมิล การดัดแปลงนี้ยังสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ FTIR ที่จะมีหมู่ฟังก์ชันของ P=O bond P-O-C bond or the P=OOH bond เกิดขึ้นหลังจากการปรับปรุงด้วยกรดฟอสฟอริก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยอื่น ๆ ที่พบว่าการดัดแปลงด้วยกรดฟอสฟอริกทำให้เกิดการอุดตันของรูพรุนเนื่องจากการสร้างหมู่ฟังก์ชันที่เป็นขั้ว เช่น ฟอสเฟตและไฮดรอกซิลบนพื้นผิว ทำให้รูพรุนขนาดใหญ่บางส่วนถูกปิดกั้น ส่งผลให้ปริมาตรรูพรุนและพื้นที่ผิวลดลง (Zhang et al., 2013; Ahmad et al., 2014)

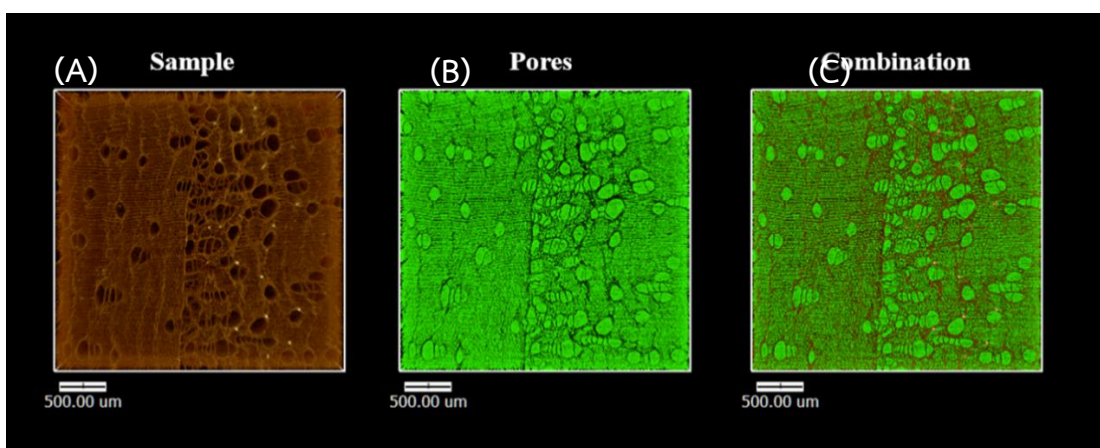


รูปที่ 4.5 ภาพถ่าย SEM ของ BCA ที่กำลังขยาย 200X (A1) กับ 500X (A2) ภาพถ่าย SEM ของ BNS ที่กำลังขยาย 200X (B1) กับ 500X (B2) และภาพถ่าย SEM ของ BHP ที่กำลังขยาย 200X (C1) กับ 500X (C2)

4.1.6 เทคนิคการถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์สามมิติระดับจุลภาคด้วยเอกซเรย์ย่านพลังงานสูงจากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอน (XTM)

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XTM (BL1.2W : X-ray Tomographic Microscopy, Synchrotron Light Research Institute) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ที่ใช้รังสีเอกซ์ในการสร้างภาพตัดขวางและภาพ 3 มิติของวัสดุ ซึ่งจะช่วยให้สามารถศึกษาลักษณะทางกายภาพทั้งภายนอก และภายในของวัสดุได้อย่างละเอียด XTM สามารถให้ข้อมูลโดยอาศัยความสามารถของรังสีเอกซ์ในการทะลุผ่านวัสดุที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน ภาพที่ได้จะนำมาสร้างเป็น Sinogram ซึ่งใช้เทคนิค

การสร้างภาพตัดขวาง เช่น Filtered Back Projection (FBP) หรือ Algebraic Reconstruction Technique (ART) เพื่อสร้างภาพตัดขวาง (CT slices) หลังจากนั้นจึงนำมาประมวลผลเป็นภาพ 3 มิติของวัสดุ จากรูปที่ 4.6 (A) แสดงภาพ Matrix phase ซึ่งเป็นพื้นผิวของแข็งหมายถึงเนื้อไบโอชาร์ ซึ่งจะเป็นตัวแทนของพื้นผิวสัมผัสของไบโอชาร์ พบว่ามีลักษณะค่อนข้างขรุขระ เนื่องจากมีรูพรุนมีการกระจายตัวอยู่อย่างไม่สม่ำเสมอ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน และการจัดเรียงรูพรุนไม่เป็นระเบียบ ส่วนรูปที่ 4.6 (B) แสดงภาพ Dispersive phase เป็นตัวแทนของรูพรุนภายในไบโอชาร์ พบว่ารูพรุนกระจายตัวอยู่ทั้งชิ้นงานแบบไม่สม่ำเสมอทั้งขนาด และปริมาตร ซึ่งแต่ละรูพรุนจะเจาะลึกเข้าไปในเนื้อไบโอชาร์ และจากรูปที่ 4.6 (C) แสดงภาพ Visualization ขององค์ประกอบ 2 ส่วนภายในตัวอย่างไบโอชาร์ ประกอบด้วยพื้นผิวของแข็ง (A ; Matrix Phase) และช่องว่างอากาศ (B ; Dispersive Phase) สำหรับค่าความพรุนของไบโอชาร์อยู่ที่ 28 เปอร์เซ็นต์ นั้นหมายความว่าอีก 72 เปอร์เซ็นต์ คือเนื้อของไบโอชาร์



รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายเอกซเรย์คอมพิวเตอร์สามมิติของ BCA

4.1.7 เทคนิควิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะและความพรุนของอนุภาค (BET)

BET เป็นเทคนิคการวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (Surface area) ของวัสดุที่ต้องการวิเคราะห์ โดยอาศัยเทคนิคการแทนที่พื้นที่ผิวหรือรูพรุนด้วยแก๊สไนโตรเจนซึ่งจะเป็นเทคนิคที่ใช้วัดพื้นที่ผิวทั้งชิ้นงาน งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เทคนิคนี้ในการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะของ BCA BNS และ BHP ซึ่งผลการทดลองพบว่า BCA มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 2.27 ตารางเมตรต่อกรัม ส่วนสำหรับปริมาตรรูพรุนรวมเท่ากับ 0.0097 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนเท่ากับ 82.34 อังสตรอม BNS มีค่า พื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 5.45 ตารางเมตรต่อกรัม ส่วนสำหรับปริมาตรรูพรุนรวมเท่ากับ 0.0057 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนเท่ากับ 22.93 อังสตรอม และ BHP มีค่า พื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 1.92 ตารางเมตรต่อกรัม ส่วนสำหรับปริมาตรรูพรุนรวมเท่ากับ 0.0043 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนเท่ากับ 50.57 อังสตรอม ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.6 เมื่อพิจารณาการจำแนก

ขนาดรูพรุนตามมาตรฐานของ International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) พบว่าขนาดรูพรุนเฉลี่ยของไบโอชาร์ที่พบอยู่ในช่วง 2.29 ถึง 8.23 นาโนเมตร จัดเป็นรูพรุนขนาดกลาง คือ มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยอยู่ในช่วงระหว่าง 2 ถึง 50 นาโนเมตร (Yokoyama et al., 2019) ความแตกต่างในโครงสร้างรูพรุนเกิดจากการดัดแปลงด้วยสารเคมี โดยจากชุดข้อมูลสามชุดนี้ จะสามารถชี้ให้เห็นถึงความแตกต่างของพื้นที่ผิวจำเพาะของ BCA BNS และ BHP ซึ่งจะมีความสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นที่กล่าวว่า การใช้กรดฟอสฟอริกในการดัดแปลงจะส่งผลให้มีการเพิ่มปริมาตรรูพรุนและทำให้โครงสร้างเมโซพอร์เด่นชัดยิ่งขึ้นของพื้นที่ผิว (Chen et al., 2018) โดยจะเห็นได้ว่าไบโอชาร์ที่ดัดแปลงด้วยกรดฟอสฟอริกจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะที่ต่ำกว่า ซึ่งจะสัมพันธ์กับภาพถ่ายของ SEM ของไบโอชาร์จากเหง้ามันสำปะหลังที่ดัดแปลงด้วยกรดฟอสฟอริกมีลักษณะที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม คือโครงสร้างมีการเรียงตัวกันและพื้นผิวมีความสะอาดมากขึ้นเห็นได้ชัดขึ้น ส่วนสำหรับ BNS ในปริมาณ 1 กรัมของไบโอชาร์ที่นำไปใช้ในการดูดซับเมธิลีน จะมียพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างไบโอชาร์ และเมธิลีนประมาณ 5.45 ตารางเมตรต่อกรัม การดัดแปลงด้วยไฮเดียมซัลไฟด์ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิว และปรับปรุงโครงสร้างของรูพรุน ทำให้รูพรุนมีขนาดเล็กและกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอเหมาะสมสำหรับการดูดซับสารปนเปื้อนที่มีโมเลกุลขนาดเล็กและกลาง แต่อย่างไรก็ตามต้องคำนึงถึงหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวจากผล FTIR ร่วมด้วย

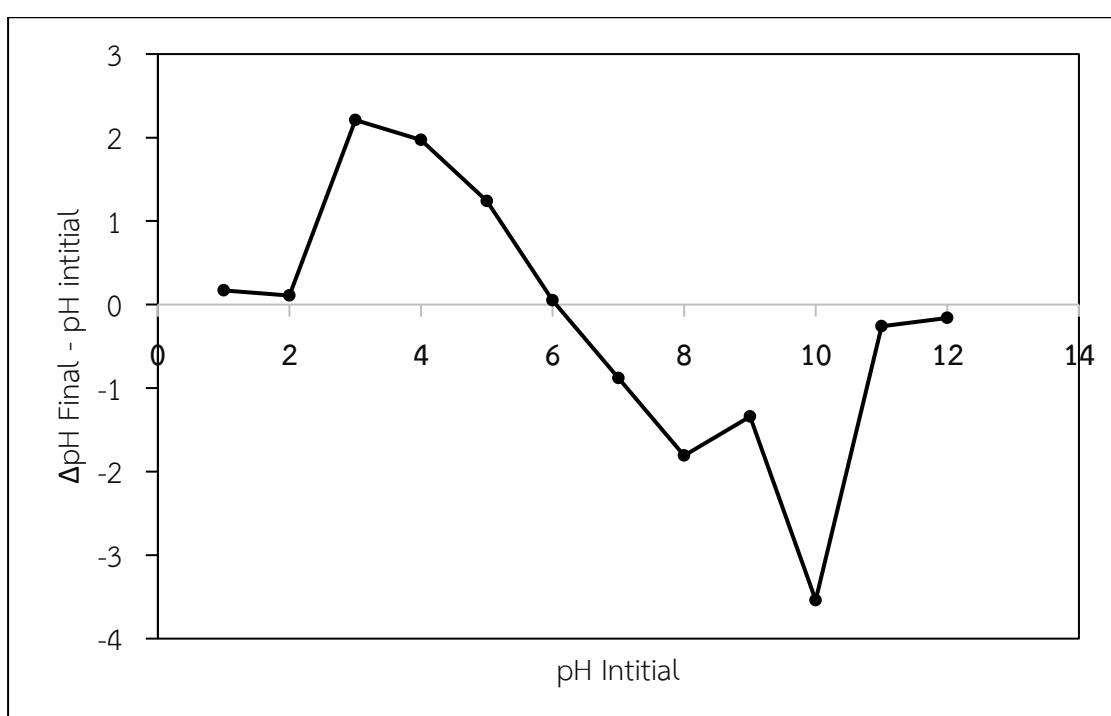
ตารางที่ 4.6 คุณสมบัติทางกายภาพของไบโอชาร์

คุณสมบัติทางกายภาพ	ตัวอย่าง BCA	ตัวอย่าง BNS	ตัวอย่าง BHP
พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเมตรต่อกรัม)	2.27	5.45	1.92
ปริมาตรรูพรุนรวม (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม)	0.0097	0.0057	0.0043
ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุน (อังสตรอม)	82.34	22.93	50.57

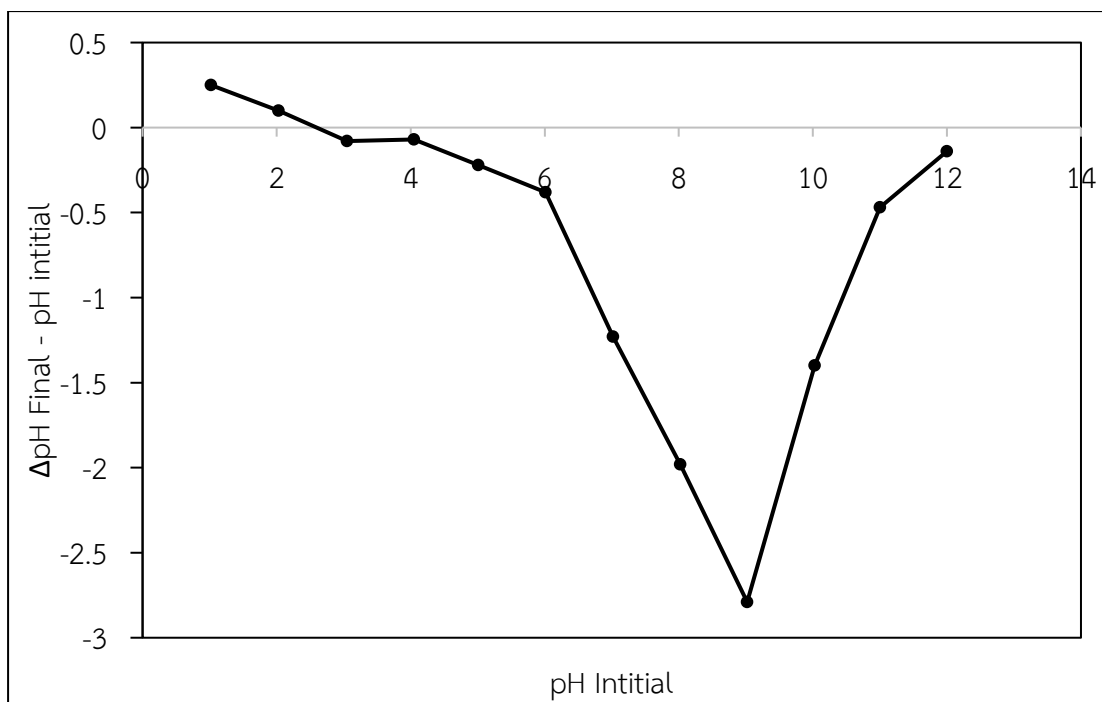
4.1.8 เทคนิคการวิเคราะห์ค่าประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ (pH_{pzc})

จากผลการศึกษาการแสดงประจุบนพื้นผิวดูดซับ ตัวดูดซับในงานวิจัยนี้คือ BCA BNS และ BHP โดยการศึกษาค่าพีเอชที่ประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ ของตัวดูดซับดังแสดงในรูปที่ 4.7 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่า ค่าประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ของ BCA เท่ากับ 6.07 BNS เท่ากับ 2.60 และ BHP เท่ากับ 5.26 ตามลำดับ โดยค่าประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ หมายถึงค่าความเป็นกรดต่างที่ผลรวมของประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับเท่ากับศูนย์ เมื่อค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายมีค่าต่ำกว่าค่าความเป็นกรดต่างที่ประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ ($\text{pH} < \text{pH}_{\text{pzc}}$) จะส่งผลทำให้ผิวของสารดูดซับแสดงประจุเป็นบวก และเมื่อค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายมีค่าสูงกว่าค่าประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ ($\text{pH} > \text{pH}_{\text{pzc}}$) จะส่งผลทำให้ผิวของสารดูดซับแสดงประจุเป็นลบ (Yang et al., 2004) ผลการศึกษาในครั้งนี้พบว่า ค่าประจุพื้นผิวเป็นศูนย์มีความสำคัญต่อปฏิสัมพันธ์ระหว่างไฟฟ้าสถิต ซึ่งเป็นกลไก

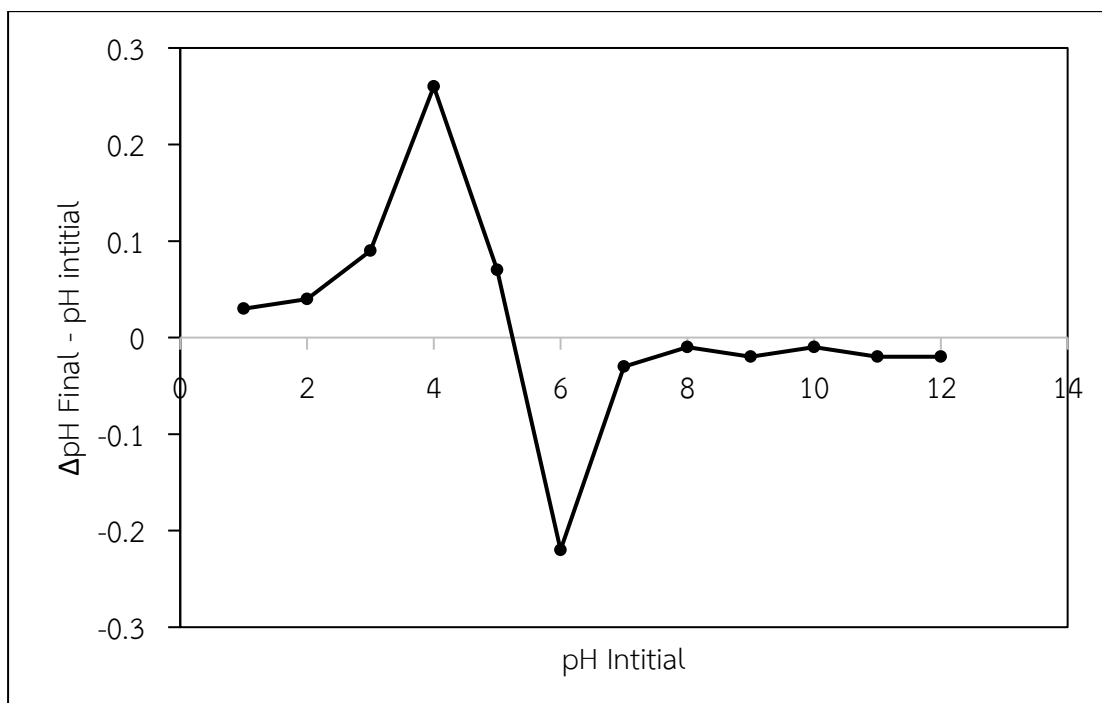
หลักในการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ที่เป็นไอออนิกและไอออนไนซ์ได้ นั้นหมายความว่าเมื่อสารละลายมีค่าต่ำกว่าค่าประจุพื้นผิวเป็นศูนย์จะส่งผลให้ประจุบนพื้นผิวมีค่าเป็นบวก และจะสามารถดูดจับการสารที่มีประจุได้ดี (Mukherjee et al., 2011) สำหรับ BNS ค่าประจุพื้นผิวเป็นศูนย์เท่ากับ 2.60 ดังแสดงในรูปที่ 4.8 การดัดแปลงด้วยโซเดียมซิลิเกตทำให้พื้นผิวมีคุณสมบัติเป็นด่างเมื่อค่าประจุพื้นผิวเป็นศูนย์มากกว่า 2.60 ส่งผลให้มีความเหมาะสมสำหรับการดูดซับสารอินทรีย์ที่มีประจุบวก และสุดท้าย BHP ค่าประจุพื้นผิวเป็นศูนย์เท่ากับ 5.26 ดังแสดงในรูปที่ 4.9 การดัดแปลงด้วยกรดฟอสฟอริกทำให้พื้นผิวมีคุณสมบัติเป็นกรดเมื่อค่าประจุพื้นผิวเป็นศูนย์น้อยกว่า 5.26 ส่งผลให้มีความเหมาะสมสำหรับการดูดซับสารอินทรีย์ที่มีประจุลบ



รูปที่ 4.7 ผลค่าพีเอชที่ประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ของ BCA



รูปที่ 4.8 ผลค่าพีเอชที่ประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ของ BNS



รูปที่ 4.9 ผลค่าพีเอชที่ประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ของ BHP

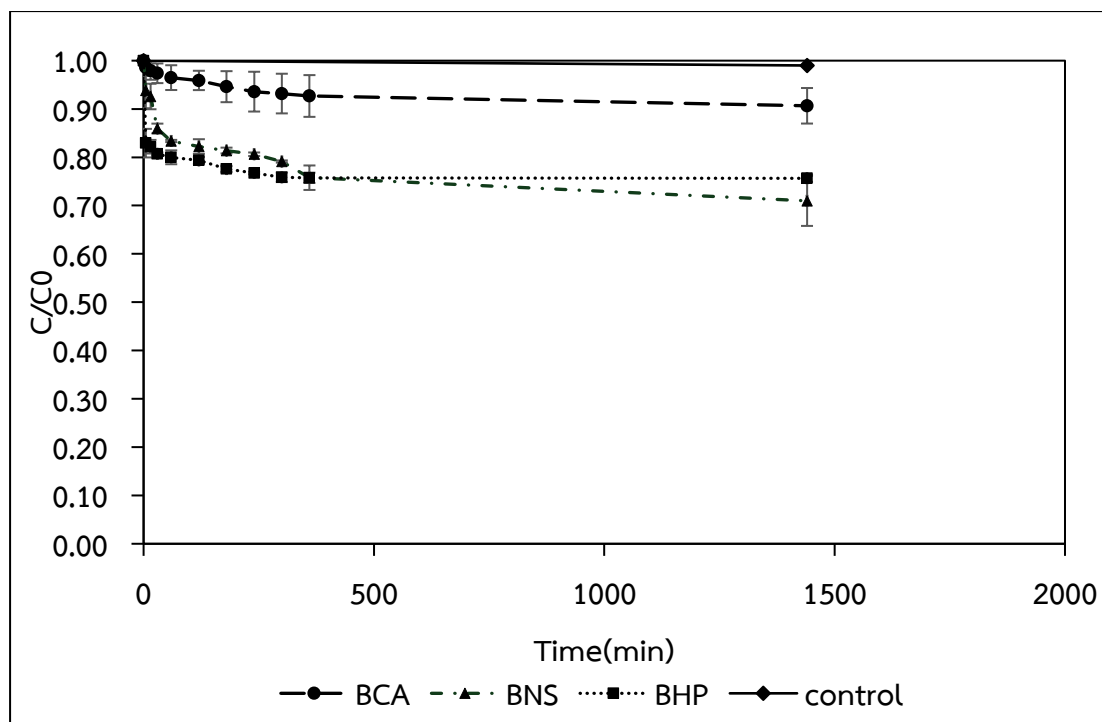
4.2 ผลการศึกษาผลการบำบัดเมโรมิล

การศึกษาการบำบัดเมโรมิลด้วยการดูดซับโดยไบโอชาร์ ได้ทำการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ระยะเวลาสัมผัส ค่าความเป็นกรดต่าง ค่าความเร็รรอบ น้ำหนักวัสดุดูดซับ โดยจะใช้ไบโอชาร์ทั้งหมดสามชนิด BCA BNS และ BHP ซึ่งความเข้มข้นของเมโรมิลจะได้รับการตรวจวัดด้วยเครื่อง ด้วยเครื่อง HPLC แล้วนำผลหาแนวโน้มประสิทธิภาพการบำบัดเมโรมิลเทียบกับเวลา

4.2.1 ผลการศึกษาระยะเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

ผลการศึกษาระยะเวลาสัมผัสที่ส่งผลต่อการดูดซับเมโรมิลของ BCA BNS และ BHP โดยการศึกษาที่ใช้เมโรมิลความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 30 มิลลิลิตร โดยใช้ค่าความเป็นกรดต่างเริ่มต้น ในช่วง 5.50 ถึง 6.50 นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที โดยเก็บสารละลายเมโรมิลที่เหลืออยู่ตามระยะเวลา 5 15 30 60 120 180 240 300 360 และ 1440 จนเริ่มเข้าสู่สมดุล รายละเอียดผลการศึกษานำผลการศึกษามาทำกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า C/C_0 และระยะเวลาสัมผัส ดังแสดงรูปที่ 4.10 จากผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.10 พบว่าค่า C/C_0 ของไบโอชาร์ทั้งสามชนิดลดลงอย่างรวดเร็ว ในช่วงระยะเวลา 5 ถึง 60 นาทีแรก แสดงถึงการดูดซับเมโรมิลในอัตราที่สูงในช่วงต้น หลังจากนั้นค่า C/C_0 ลดลงในอัตราที่ช้าลง และแนวโน้มเข้าสู่สมดุลเมื่อเวลาผ่านไปถึง 300 ถึง 1440 นาที สำหรับผลการดูดซับของ BCA พบว่าค่า C/C_0 ลดลงเล็กน้อยในช่วงต้น และค่อนข้างคงที่จนถึงช่วงระยะเวลาสุดท้าย ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพการดูดซับต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับไบโอชาร์ชนิดอื่น ๆ ส่วนสำหรับ BNS พบว่าค่า C/C_0 ลดลงในอัตราที่สูงกว่า BCA และมีแนวโน้มเข้าสู่สมดุลเร็วขึ้น และสุดท้ายผลการดูดซับของ BHP พบว่าค่า C/C_0 ลดลงมากที่สุดในช่วงต้นของการทดลอง

จากการทดลอง พบว่าไบโอชาร์ทั้งสามชนิดเข้าสู่สมดุลที่เวลาประมาณ 1440 นาที โดยค่า C/C_0 ไม่มีการเปลี่ยนแปลงหลังจากช่วงเวลานี้ การเข้าสู่สมดุลแสดงถึงจุดที่เมโรมิลไม่สามารถดูดซับเพิ่มเติมบนพื้นผิวของไบโอชาร์ได้อีกและพื้นที่ผิวที่สามารถดูดซับได้ถูกใช้งานจนเต็มศักยภาพ สำหรับไบโอชาร์ที่ผ่านการดัดแปลงมีประสิทธิภาพในการดูดซับเมโรมิลสูงกว่าไบโอชาร์ที่ไม่ได้รับการดัดแปลง โดย BHP แสดงให้เห็นถึงอัตราการดูดซับสูงสุดในช่วงต้นของการทดลอง ซึ่งสามารถอธิบายได้จากพันธะไฮโดรเจนและปฏิกิริยาทางไฟฟ้าสถิตที่เพิ่มขึ้นจากหมู่ฟังก์ชัน -OH -COOH และหมู่ฟังก์ชันฟอสเฟตที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของไบโอชาร์ ซึ่งสอดคล้องกับผล FTIR ในขณะที่ BNS มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุดอยู่ที่ 5.45 ตารางเมตรต่อกรัม และขนาดรูพรุนเล็กที่สุดเท่ากับ 2.29 นาโนเมตร ทำให้เกิดการดูดซับอย่างมีประสิทธิภาพ และเข้าสู่สมดุลได้เร็วกว่า BHP ส่วนไบโอชาร์จากเหง้ามันสำปะหลังที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปลง BCA มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่ต่ำกว่าคือ 2.27 ตารางเมตรต่อกรัม และขนาดรูพรุนใหญ่ที่สุดเท่ากับ 8.23 นาโนเมตร ทำให้มีอัตราการดูดซับต่ำที่สุดเนื่องจากพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่า และรูพรุนที่ใหญ่เกินไปอาจลดประสิทธิภาพในการกักเก็บเมโรมิล กลไกที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย การเติมรูพรุน การแพร่กระจาย ปฏิกิริยา π - π และปฏิกิริยาทางไฟฟ้าสถิต ซึ่งสอดคล้องการดูดซับด้วยไบโอชาร์ของ Inyang & Dickenson, 2015 สามารถสรุปได้ว่า การดัดแปลงไบโอชาร์ด้วยไฮเดียมซัลไฟด์และกรดฟอสฟอริกช่วยเพิ่มหมู่ฟังก์ชันที่เอื้อต่อการดูดซับ และทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดเมโรมิลดีขึ้น โดยเฉพาะในกรณีของเมโรมิลที่ต้องอาศัยทั้งกลไกทางกายภาพและทางเคมีในการดูดซับเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ

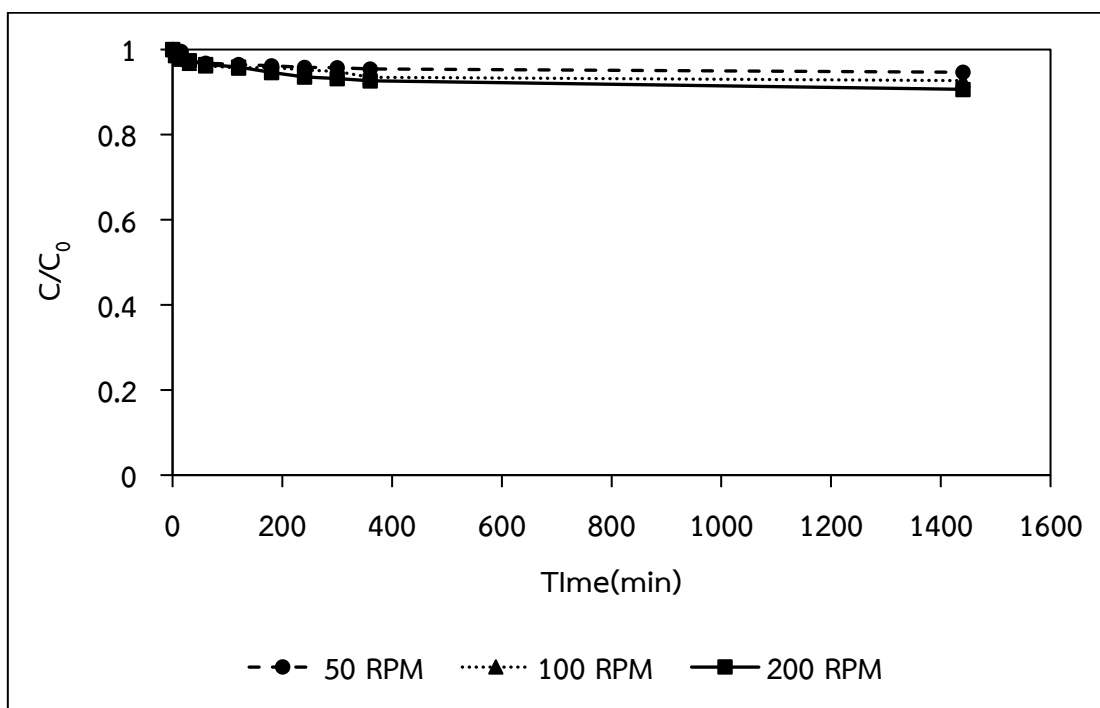


รูปที่ 4.10 ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับเมโรไมลของ ไบโอดีจากเหง้า
มันสำปะหลัง BCA BNS และ BHP

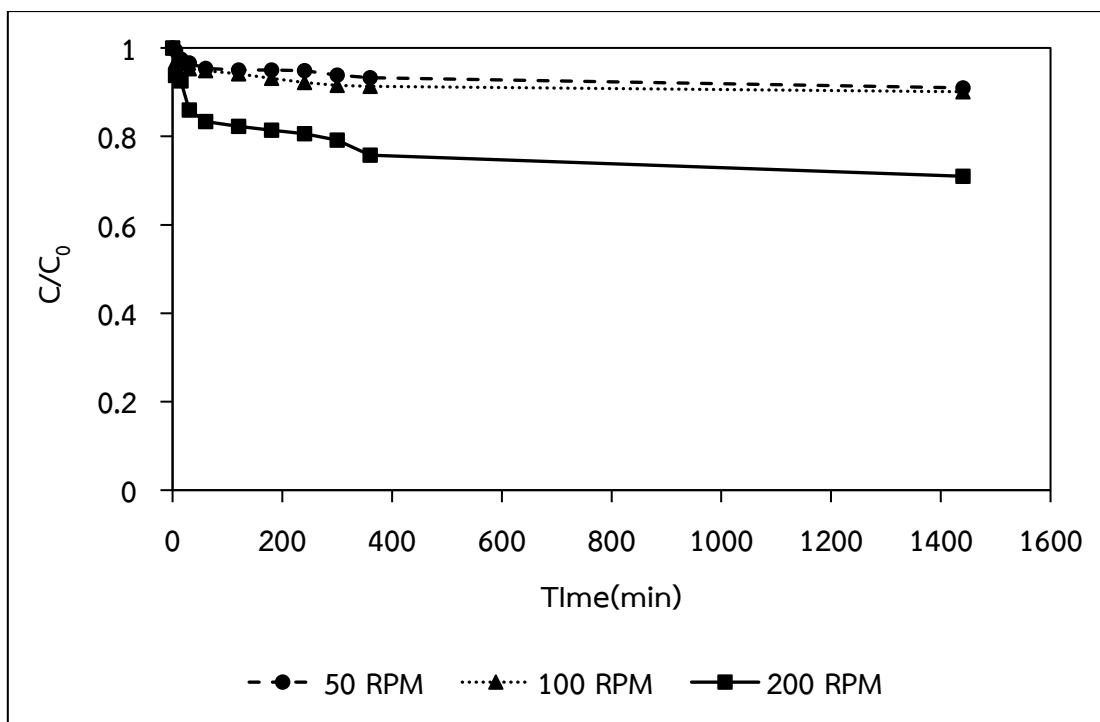
4.2.2 ผลของค่าความเร็วรอบต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

ผลการศึกษาความเร็วรอบที่มีต่อการดูดซับเมโรไมล โดยการศึกษาที่ใช้เมโรไมล ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 30 มิลลิลิตร โดยใช้ค่าความเป็นกรดต่างเริ่มต้นในช่วง 5.50 ถึง 6.50 และเก็บสารละลายเมโรไมลที่เหลืออยู่ตามระยะเวลา 5 15 30 60 120 180 240 300 360 และ 1440 จนเริ่มเข้าสู่สมดุล โดยศึกษาช่วงความเร็วรอบ 50 100 และ 200 รอบต่อนาที รายละเอียดผลการศึกษานำผลการศึกษามาทำกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า C/C_0 และระยะเวลาสัมผัส ดังแสดงรูปที่ 4.11 4.12 และ 4.13 พบว่าค่า C/C_0 ของ BCA ค่อนข้างคงที่ในทุกความเร็วรอบ โดยค่า C/C_0 มีการลดลงเล็กน้อยในช่วงแรกของการทดลอง 0 ถึง 200 นาที และเข้าสู่สมดุลในเวลา ประมาณ 300 ถึง 400 นาที ค่า C/C_0 ที่ได้จากทุกความเร็วรอบมีค่าใกล้เคียงกัน C/C_0 ประมาณ 0.96 ถึง 0.99 แสดงให้เห็นว่าความเร็วรอบไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับของ BCA เนื่องจากโครงสร้างพื้นผิว และรูพรุนที่จำกัดของไบโอดี สำหรับ BNS แสดงการลดลงของค่า C/C_0 อย่างชัดเจนเมื่อเพิ่มความเร็วรอบ โดยเฉพาะที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ค่า C/C_0 ลดลงถึง ประมาณ 0.75 ซึ่งต่ำที่สุดในความเร็วรอบที่ศึกษา ในขณะที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที ค่า C/C_0 ลดลงอยู่ที่ประมาณ 0.85 และที่ 50 รอบต่อนาที มีค่าใกล้เคียง 0.90 และผลของ BHP พบว่า C/C_0 ลดลงต่ำสุดเมื่อเพิ่มความเร็วรอบ โดยที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ค่า C/C_0 ลดลงถึงประมาณ 0.70 ซึ่งเป็นค่าต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับไบโอดีชนิดอื่น ๆ ขณะที่ 100 rpm ค่า C/C_0 อยู่ที่ประมาณ 0.80 และที่ 50 รอบต่อนาที อยู่ที่ประมาณ 0.88 จะเห็นว่า BHP มีประสิทธิภาพสูงสุดในทุกความเร็วรอบ

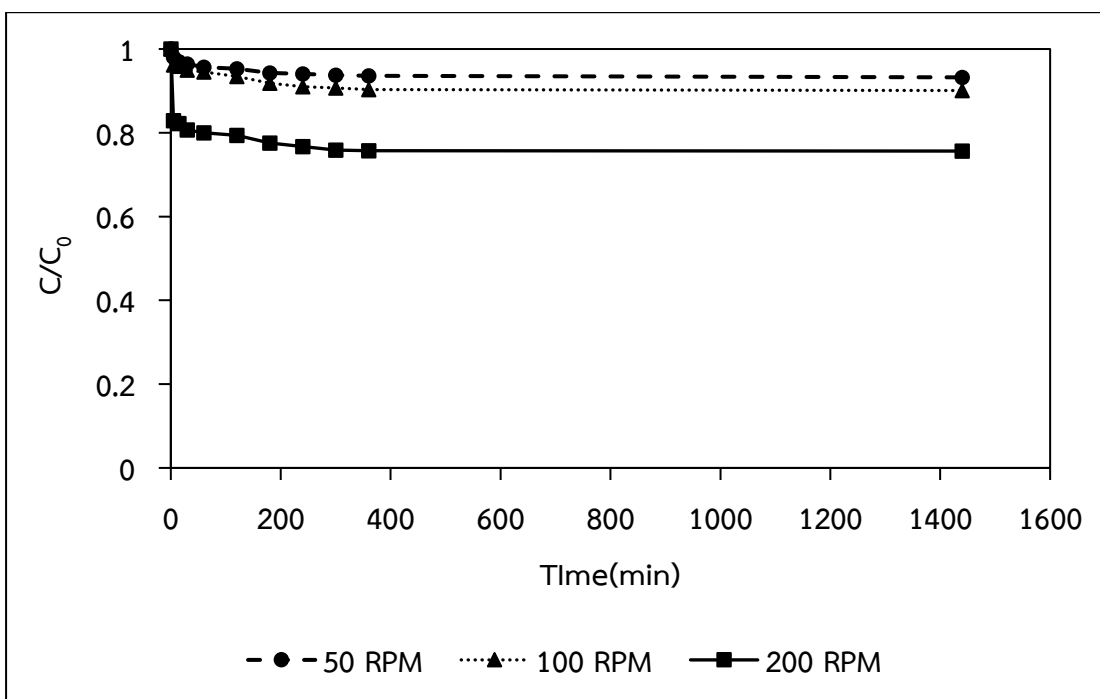
การศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าความเร็วรอบมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับเมธิลีน โดยเฉพาะในไบโอชาร์ที่ผ่านการดัดแปลง BNS และ BHP ซึ่งสามารถอธิบายผลกระทบที่เกิดขึ้นได้จาก ผลของการถ่ายโอนมวล (Mass transfer) เมื่อความเร็วรอบสูงขึ้นจะช่วยลด Boundary Layer ที่อยู่รอบ ๆ อนุภาคไบโอชาร์ทำให้โมเลกุลของเมธิลีนสามารถเข้าสู่รูพรุนของไบโอชาร์ได้เร็วขึ้น เนื่องจากในไบโอชาร์ที่มีรูพรุนขนาดกลาง ซึ่งความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้นช่วยเร่งกระบวนการแพร่กระจายของเมธิลีนเข้าสู่รูพรุนภายในของไบโอชาร์ และสามารถจับกับพื้นผิวไบโอชาร์ได้มากขึ้น สำหรับไบโอชาร์ที่ได้รับดัดแปลงความเร็วรอบที่สูงขึ้นช่วยเพิ่มโอกาสให้เกิดปฏิสัมพันธ์ไฟฟ้าสถิต และ π - π Interactions ระหว่างประจุของไบโอชาร์ และโมเลกุลเมธิลีน ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับดีขึ้น เนื่องจากมีหมู่ฟังก์ชันที่เพิ่มขึ้น รวมถึงโครงสร้างรูพรุนที่เหมาะสม ทำให้สามารถจับกับเมธิลีนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะมีความสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นที่กล่าวว่า ความเร็วรอบมีบทบาทสำคัญในการควบคุมกลไกการถ่ายโอนมวล ที่ความเร็วต่ำมีประสิทธิภาพต่ำกว่า เนื่องจากการถ่ายโอนมวลช้า และสารดูดซับไม่กระจายตัวเต็มที่ (Priyadarshini et al., 2018)



รูปที่ 4.11 ผลของความเร็วรอบต่อการดูดซับเมธิลีนด้วย BCA



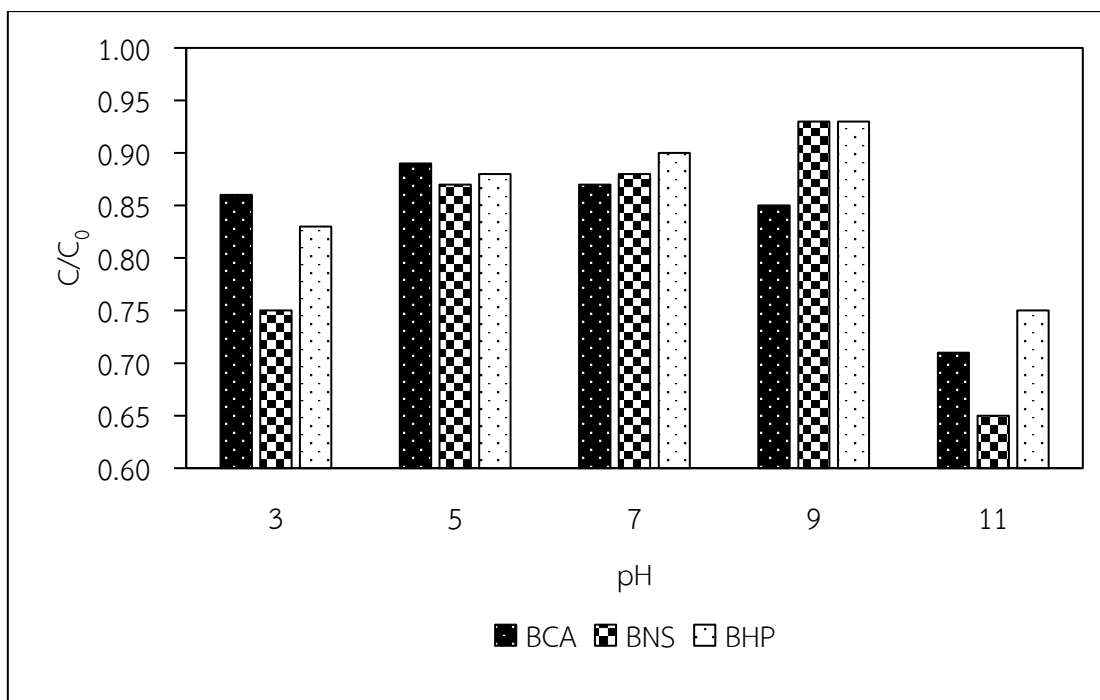
รูปที่ 4.12 ผลของความเร็วยรอบต่อการดูดซับเมไธมิลด้วย BNS



รูปที่ 4.13 ผลของความเร็วยรอบต่อการดูดซับเมไธมิลด้วย BHP

4.2.3 ผลของค่าความเป็นกรดต่างต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

ผลการศึกษาค่าค่าความเป็นกรดต่าง ที่ส่งผลต่อการดูดซับเมโรมิลของ BCA BNS และ BHP โดยการศึกษาใช้เมโรมิลความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 30 มิลลิลิตร นำไปเขย่า ที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ระยะเวลาสัมผัส 1440 นาที โดยใช้ค่าความเป็นกรดต่างให้มีค่าแตกต่างกัน 5 ค่า ได้แก่ 3 5 7 9 และ 11 ทั้งนี้จะไม่พิจารณาประสิทธิภาพการดูดซับที่ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 11 ซึ่งเป็นผลมาจากการสลายตัวของเมโรมิลในสภาวะต่างแก่ ซึ่งจะมีความสอดคล้องกับ Chang et al., 2008 ที่ระบุว่าเมโรมิลจะคงตัวอยู่ในช่วงค่าความเป็นกรดต่าง 2 ถึง 8 แต่เมื่อค่าความเป็นกรดต่างมีค่ามากกว่า 10 เมโรมิลจะเริ่มมีการสลายตัวเกิดขึ้น ซึ่งจะสลายตัวไปเป็นสารประกอบอื่น แต่ยังคงความเป็นพิษ รายละเอียดผลการศึกษานำผลการศึกษามาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชกับ C/C_0 ดังรูปที่ 4.14 พบว่า BNS และ BHP มีประสิทธิภาพการดูดซับที่ดีที่สุด ในสภาวะกรดที่ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 3 โดย BNS มีค่า C/C_0 เท่ากับ 0.75 และ BHP มีค่า C/C_0 เท่ากับ 0.83 ซึ่งความสามารถในการดูดซับนี้สัมพันธ์กับค่าประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ของ BNS มีประจุพื้นผิวเป็นศูนย์เท่ากับ 2.60 ส่งผลให้พื้นผิวมีประจุลบในสภาวะค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 3 ทำให้ไบโอชาร์มีความสามารถในการดูดซับสารที่มีประจุบวกได้ดี ซึ่งในสภาวะที่พีเอช 3 กลุ่มฟังก์ชันของเมโรมิลที่อยู่ในกลุ่มคาร์บาเมทจะมีประจุเป็นบวก (Atkins, P., & de Paula, J., 2010) ส่งผลให้เมโรมิล และไบโอชาร์จะเกิดการดึงดูดกันโดยกลไกไฟฟ้าสถิตมาเสริมทำให้ประสิทธิภาพดีขึ้น และ BHP มีค่าประจุพื้นผิวเป็นศูนย์เท่ากับ 5.15 ส่งผลให้พื้นผิวมีประจุบวกในสภาวะค่าความเป็นกรดต่างต่ำ และสามารถจับกับเมโรมิลที่มีขั้วได้ ในขณะที่ BCA มีประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 5 มีค่า C/C_0 เท่ากับ 0.89 เนื่องจากค่าประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ของ BCA อยู่ที่ 6.05 ซึ่งเหมาะสำหรับการดูดซับในสภาวะเป็นกรดถึงกลาง ซึ่งจะมีความสอดคล้องกับ Chang et al., 2008 การดูดซับมีประสิทธิภาพสูงสุดในช่วงพีเอชต่ำกว่า 5 ซึ่งเกิดจากการที่ประจุบวก (H^+) ในสารละลายเพิ่มขึ้นที่ค่าพีเอชต่ำ ส่งผลให้เมโรมิลซึ่งเป็นสารที่มีหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วหรือมีประจุลบ ถูกดึงดูดด้วยแรงไฟฟ้าสถิต กับประจุบวกบนพื้นผิวของ MN-100 การศึกษานี้ชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของค่าความเป็นกรดต่าง และการปรับปรุงพื้นผิวไบโอชาร์ในการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับที่เหมาะสมกับสารปนเปื้อนในสภาวะต่าง ๆ

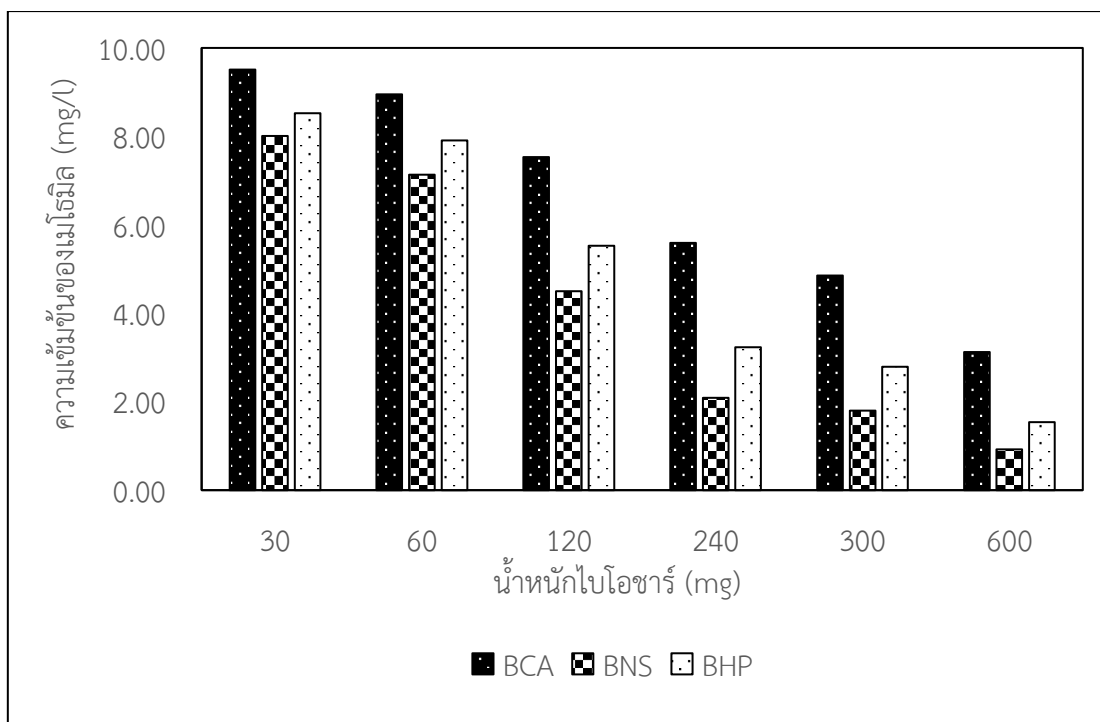


รูปที่ 4.14 ผลของค่าความเป็นกรดต่างต่อการดูดซับเมโรมิลด้วยไบโอชาร์

4.2.4 ผลของน้ำหนักรวสดูดซับต่อประสิทธิภาพการดูดซับเมโรมิล

ผลการศึกษาค่าน้ำหนักรวสดูดซับต่อประสิทธิภาพการดูดซับเมโรมิลของ BCA BNS และ BHP แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของไบโอชาร์และความสามารถในการดูดซับเมโรมิล โดยการทดลองนี้ดำเนินการภายใต้สภาวะที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของเมโรมิลเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตรสารละลาย 30 มิลลิลิตร ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที และระยะเวลาสัมผัส 1440 นาที พร้อมทั้งใช้น้ำหนักไบโอชาร์ในปริมาณที่แตกต่างกัน 6 ค่า ได้แก่ 30 60 120 240 300 และ 600 มิลลิกรัม

ผลการทดลองจากในรูปที่ 4.15 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มน้ำหนักของรวสดูดซับส่งผลให้ความเข้มข้นของเมโรมิลในสารละลายลดลง ซึ่งสะท้อนถึงปริมาณการดูดซับที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากน้ำหนักรวสดูที่มากขึ้นหมายถึงพื้นที่ผิวสัมผัสที่มากขึ้น ซึ่งช่วยให้ไบโอชาร์สามารถดูดซับเมโรมิลได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการดูดซับในตัวอย่างต่าง ๆ มีความแตกต่างกันตามชนิดของไบโอชาร์ โดย BNS และ BHP แสดงผลการดูดซับได้ดีในทุกช่วงน้ำหนัก ซึ่งสะท้อนถึงการดัดแปลงคุณสมบัติทั้งกายภาพ และสมบัติทางเคมีของพื้นผิวไบโอชาร์ จากการดัดแปลงด้วยกรดฟอสฟอริก ขณะที่ตัวอย่าง BCA แสดงผลการดูดซับต่ำกว่าไบโอชาร์อีกสองชนิดในทุกช่วงน้ำหนัก ซึ่งอาจเกิดจากการมีพื้นผิวสัมผัสและหมู่ฟังก์ชันที่น้อยกว่าไบโอชาร์ที่ดัดแปลงแล้ว การทดลองนี้ยังแสดงให้เห็นว่า การดัดแปลงด้วยโซเดียมซิลิเกตและการดัดแปลงด้วยกรดฟอสฟอริก มีผลต่อสมบัติการดูดซับของไบโอชาร์ เนื่องจากการดัดแปลงช่วยเพิ่มการเกิดรูพรุน และเพิ่มหมู่ฟังก์ชันของไบโอชาร์ ซึ่งช่วยเสริมการจับยึดของเมโรมิล



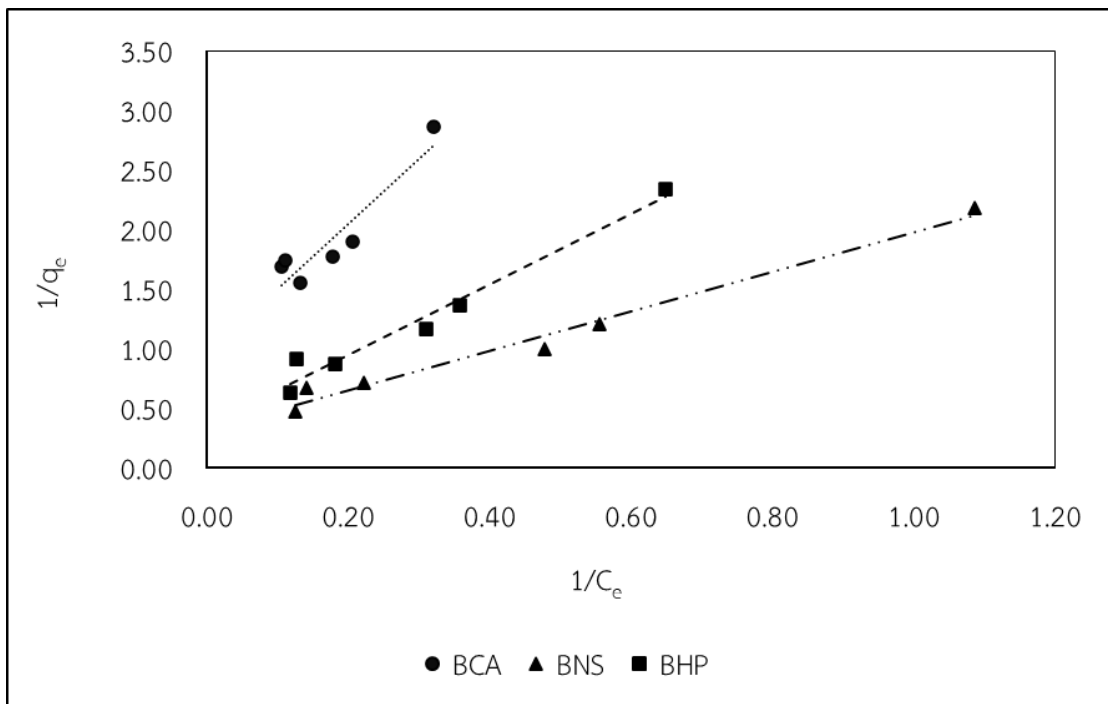
รูปที่ 4.15 ผลของค่าน้ำหนักวัสดุดูดซับการดูดซับเมโรมิล

4.2.5 ผลการศึกษาไอโซเทิร์มของการดูดซับสำหรับการดูดซับเมโรมิลของไบโอซาร์

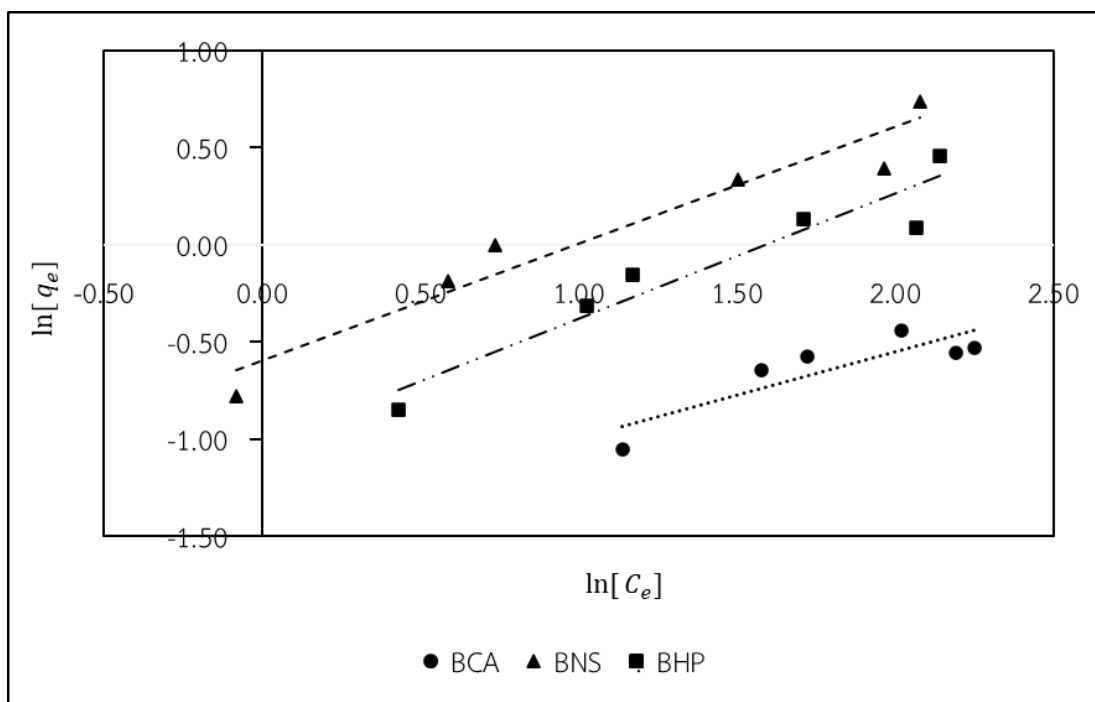
ผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับที่มีต่อการดูดซับเมโรมิลของ BCA BNS และ BHP การศึกษานี้จะใช้วิธีการดังหัวข้อ 4.2.4 ผลการทดลองแสดงให้เห็นไอโซเทิร์มที่เหมาะสม โดยสมการไอโซเทิร์มการดูดซับที่นำมาใช้คือ สมการของ Langmuir นำจากผลการศึกษาวิเคราะห์ โดยเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\frac{1}{q_e}$ กับค่า $\frac{1}{C_e}$ ดังแสดงในรูปที่ 4.16 ซึ่งสามารถคำนวณหา ค่าคงที่ q_{max} และ K_L ได้จากค่าความชันบนจุดตัดแกน y ตามลำดับ และสมการไอโซเทิร์มการดูดซับ แบบ Freundlich นำจากผลการศึกษาวิเคราะห์ โดยเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln [q_e]$ กับค่า $\ln [C_e]$ ดังแสดงในรูปที่ 4.17 ซึ่งสามารถคำนวณหา ค่าคงที่ n และ K_f ได้จากค่าความชัน บนจุดตัดแกน y ตามลำดับ โดยพิจารณาจากค่าสหสัมพันธ์ของสมการถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Correlation, R^2)

ตารางที่ 4.7 ค่าคงที่และความสามารถในการดูดซับเมโรนิตของไบโอชาร์ทั้ง 3 ชนิด ใช้ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบ Langmuir Freundlich และแบบ Temkin

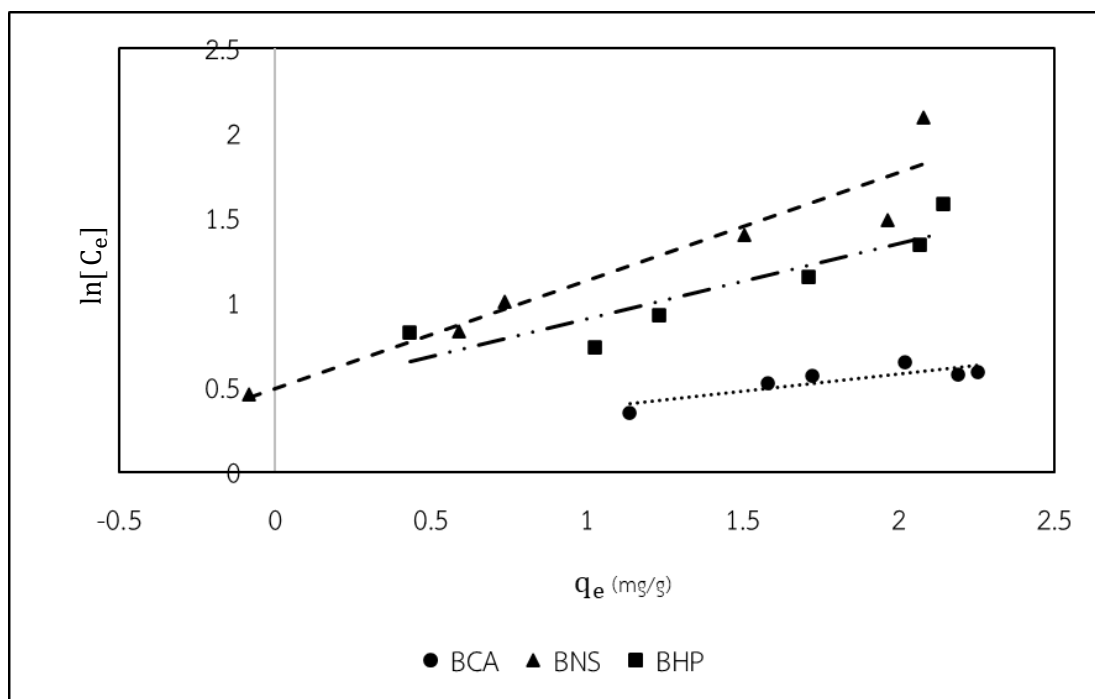
ชนิด Biochar	Langmuir constant			Freundlich constants			Temkin constants		
	q_{\max} (mg/g)	K_L (L/mg)	R^2	K_f (mg/g)	n	R^2	A (L/g)	B (J/mol)	R^2
BCA	1.03	0.176	0.8635	0.238	2.27	0.7483	2.193	0.208	0.752
BNS	3.12	0.192	0.9813	0.551	0.635	0.9377	2.149	0.638	0.910
BHP	2.8	0.121	0.9693	0.359	1.55	0.9136	2.178	0.508	0.775



รูปที่ 4.16 ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบ Langmuir ของการดูดซับเมโรนิตของไบโอชาร์ทั้งสามชนิด BCA BNS BHP



รูปที่ 4.17 ไอโซเทอรัมการดูดซับแบบ Freundlich ของการดูดซับเมโรมิลของไปโอซาร์ ทั้งสามชนิด BCA BNS BHP



รูปที่ 4.18 ไอโซเทอรัมการดูดซับแบบ Temkin ของการดูดซับเมโรมิลของไปโอซาร์ ทั้งสามชนิด BCA BNS BHP

จากผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.7 พบว่าไอโซเทอร์ม Langmuir และ Freundlich ต่างมีการอธิบายพฤติกรรมการดูดซับเมโรมิลบนไบโอชาร์ โดยพิจารณาจากค่าความสัมพันธ์ R^2 ที่บ่งชี้ถึงความเหมาะสมของแบบจำลอง สำหรับไอโซเทอร์ม Langmuir ค่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (q_{max}) พบว่ามีค่าสูงสุดในตัวอย่าง BNS เท่ากับ 3.12 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งสูงกว่า BHP และ BCA บ่งชี้ว่า BNS มีพื้นที่ผิวและหมู่ฟังก์ชันที่เหมาะสมต่อการจับกับเมโรมิลได้ดีกว่า นอกจากนี้ค่าคงที่ Langmuir (K_L) ที่แสดงถึงความแข็งแรงของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวดูดซับกับสาร พบว่า BNS มีค่า K_L สูงที่สุดอยู่ที่ 0.192 ลิตรต่อกรัม ซึ่งแสดงถึงการยึดเกาะที่มีความมีความเสถียร ในส่วนของไอโซเทอร์ม Freundlich ค่าคงที่ K_f ที่สะท้อนถึงความสามารถในการดูดซับพบว่า BNS มีค่า K_f สูงที่สุด 0.551 รองลงมาคือ BHP และ BCA จากค่าความสัมพันธ์ R^2 พบว่า ไอโซเทอร์ม Langmuir มีค่าความสัมพันธ์สูงกว่าในทุกตัวอย่าง โดยเฉพาะใน BNS โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9813 ซึ่งแสดงถึงการดูดซับแบบชั้นเดียวบนพื้นผิวที่เป็นเนื้อเดียวกัน ในขณะที่ไอโซเทอร์ม Freundlich แสดงค่าความสัมพันธ์ที่ต่ำกว่าเล็กน้อย ผลการศึกษาไอโซเทอร์ม Langmuir สามารถอธิบายพฤติกรรมการดูดซับได้ดีกว่ามีค่าความสัมพันธ์สูงกว่าในไบโอชาร์ทั้งสามชนิด ส่วนในแบบจำลอง Temkin พบว่าตัวดูดซับ BNS ให้ค่าความสัมพันธ์ R^2 สูงที่สุดเท่ากับ 0.910 และมีค่าคงที่ B สูงสุดที่ 0.638 จูลต่อโมล ซึ่งบ่งชี้ถึงพลังงานของการดูดซับที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวดูดซับอื่น ๆ ส่วนค่า A ซึ่งแสดงถึงค่าคงที่สมดุล (Binding constant) มีค่าคล้ายกันในทุกตัวอย่างอยู่ที่ประมาณ 2.15 ถึง 2.19 ลิตรต่อกรัม ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มการดูดซับที่เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นในระบบ โดยเฉพาะ BNS ที่แสดงศักยภาพในการดูดซับเมโรมิลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

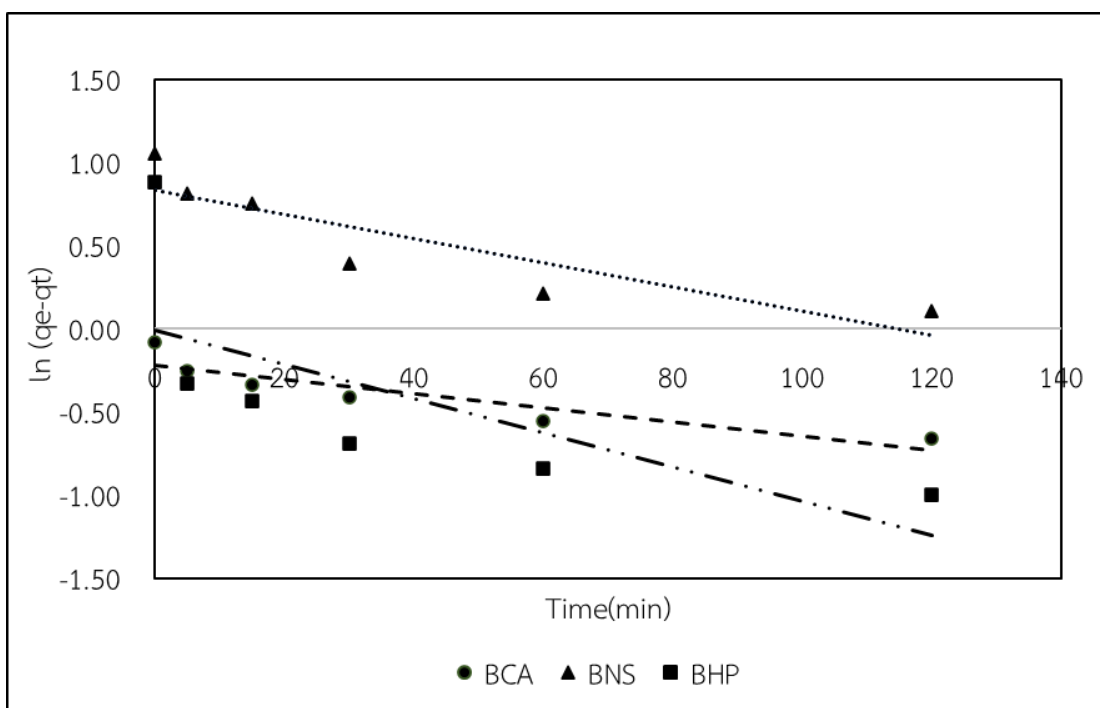
4.2.6 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์สำหรับการดูดซับเมโรมิลของไบโอชาร์

ผลการศึกษาอัตราเร็วปฏิกิริยาในการเข้าสู่สมดุลสำหรับการดูดซับเมโรมิลของ BCA BNS และ BHP โดยการศึกษาใช้เมโรมิล ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 30 มิลลิลิตร โดยใช้ค่าความเป็นกรดต่างเริ่มต้น ในช่วง 5.50 ถึง 6.50 นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที โดยเก็บสารละลายเมโรมิลที่เหลือเป็นระยะเวลา 1440 นาที ที่อุณหภูมิห้อง จากผลการศึกษา นำข้อมูลมาทดสอบเพื่อศึกษาอัตราเร็วของปฏิกิริยาการดูดซับเมโรมิลของไบโอชาร์ โดยสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายนำมาทดสอบ 2 สมการ คือ สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเทียม และจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียม ผลการทดลองพบว่าตัวอย่างไบโอชาร์ทั้งสามชนิด ได้แก่ BCA BNS และ BHP สอดคล้องกับแบบจำลองจลนพลศาสตร์ลำดับที่สองเทียม มากกว่าแบบจำลองลำดับที่หนึ่งเทียม โดยพิจารณาจากค่า R^2 ที่สูงที่สุด BCA BNS และ BHP มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9995 0.9743 0.9995 ตามลำดับ โดยตัวแปรสำคัญในโมเดลนี้ ได้แก่ K_2 เท่ากับ 0.0021 0.0320 0.3263 กรัมต่อมิลลิกรัมต่ออนาที ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงความเร็วของการดูดซับบนผิวของตัวดูดซับและ q_e เท่ากับ 1.447 0.417 2.055 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงปริมาณการดูดซับที่สมดุลของไบโอชาร์ ผลลัพธ์นี้บ่งบอกว่ากระบวนการดูดซับถูกควบคุมด้วยปฏิกิริยาเคมีระหว่างพื้นผิวของไบโอชาร์ เช่น ปฏิกิริยาทางไฟฟ้าสถิต หรือการจับกันผ่านหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว แบบจำลองนี้ชี้ให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับถูกควบคุมด้วยปฏิกิริยาเคมีระหว่างพื้นผิวของไบโอชาร์และเมโรมิล การดัดแปลงนี้ช่วยเพิ่มสมบัติการดูดซับของไบโอชาร์ได้

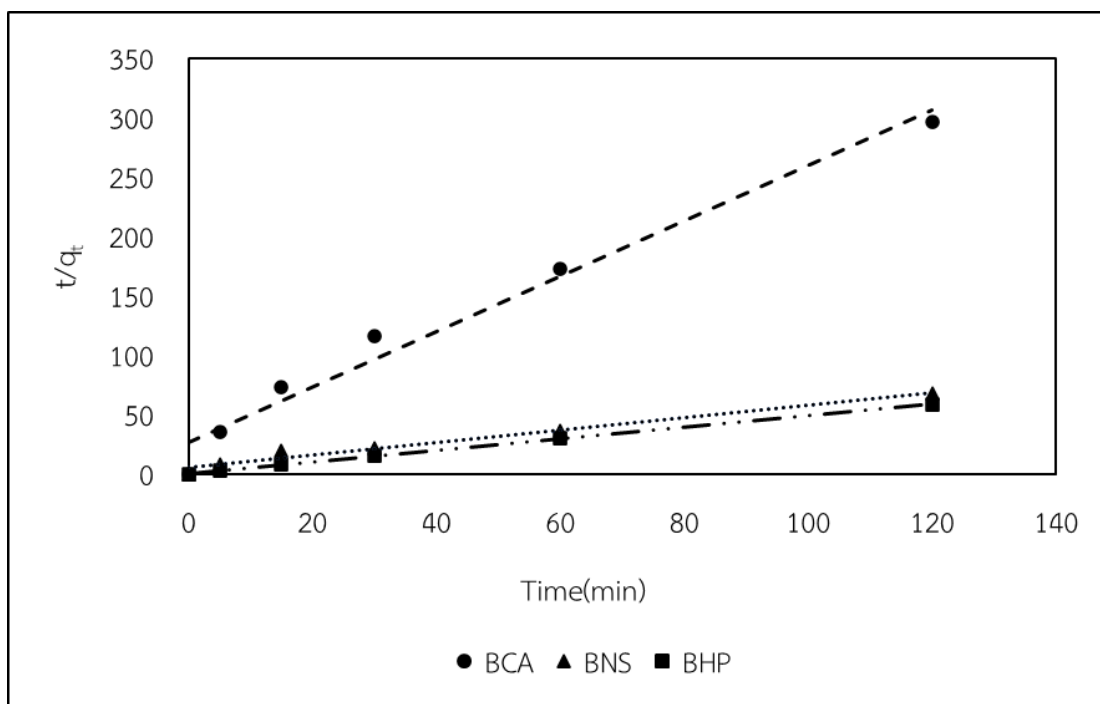
อย่างมีประสิทธิภาพ โดยภาพรวมสรุปได้ว่าไบโอชาร์ทั้งสามชนิดเหมาะสมกับ จลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียม ซึ่งแสดงถึงกระบวนการดูดซับที่ถูกควบคุมด้วยปฏิกิริยาเคมี

ตารางที่ 4.8 ค่าคงที่และความสามารถในการดูดซับเมธิลของไบโอชาร์ทั้ง 3 ชนิด ใช้จลนพลศาสตร์การดูดซับแบบ Pseudo-first-order และแบบ Pseudo-second-order

Biochar	Pseudo-first-order			Pseudo-second-order		
	K_1 (min^{-1})	q_e (mg/g)	R^2	K_2 ($\text{g/mg}\cdot\text{min}$)	q_e (mg/g)	R^2
BCA	0.0103	0.994	0.4829	0.0021	1.447	0.9995
BNS	0.0073	0.834	0.7782	0.0320	0.417	0.9743
BHP	0.0103	0.994	0.4829	0.3263	2.055	0.9995



รูปที่ 4.19 จลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเทียมของการดูดซับเมธิลของไบโอชาร์ BCA BNS BHP



รูปที่ 4.20 จลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียมของการดูดซับเมโรมิลของการดูดซับเมโรมิลของไบโอชาร์ BCA BNS BHP

4.2.7 กลไกการดูดซับเมโรมิลของไบโอชาร์

กลไกการดูดซับเมโรมิลบนพื้นผิวไบโอชาร์สามารถจำแนกออกเป็น 2 กลไกหลักได้แก่ กลไกทางกายภาพ และกลไกทางเคมีซึ่งทั้งสองกลไกนี้มีส่วนร่วมกันในการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับของไบโอชาร์

4.2.7.1 กลไกทางกายภาพ

จากผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอชาร์ด้วยเทคนิค BET และ SEM พบว่าไบโอชาร์ทั้งสามชนิด ได้แก่ BCA BNS และ BHP มีรูพรุนเฉลี่ยอยู่ในช่วงรูพรุนขนาดกลาง (2–50 นาโนเมตร) โดย BCA มีรูพรุนเฉลี่ย 8.23 นาโนเมตร BHP เท่ากับ 5.06 นาโนเมตร และ BNS เท่ากับ 2.29 นาโนเมตร ตามลำดับ ซึ่งช่วงขนาดดังกล่าวเอื้อต่อการแพร่กระจายของโมเลกุลเมโรมิลเข้าสู่โครงสร้างรูพรุนของไบโอชาร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ หลังจากที่เมโรมิลเคลื่อนที่เข้าสู่ภายในรูพรุนแล้ว จะมีโอกาสมากขึ้นในการสัมผัสและจับยึดกับหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ที่อยู่บนพื้นผิวภายในของไบโอชาร์ ผ่านกลไกทางเคมี เช่น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลหรือพันธะไฮโดรเจน นอกจากนี้พื้นที่ผิวจำเพาะยังเป็นอีกปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับโดย BNS มีค่า BET สูงสุด 5.45 ตารางเมตรต่อกรัม แสดงให้เห็นถึงพื้นที่ผิวรวมทั้งหมดที่มีโอกาสให้เมโรมิลยึดเกาะ อย่างไรก็ตาม ผลการดูดซับของ BHP ที่มี BET ต่ำกว่า 1.92 ตารางเมตรต่อกรัม แต่มีประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุด ชี้ให้เห็นว่าเพียงแคพื้นที่ผิวไม่สามารถอธิบายสมบัติการดูดซับได้ทั้งหมด ยังต้องคำนึงถึงขนาดรูพรุนที่เหมาะสม การจัดเรียง

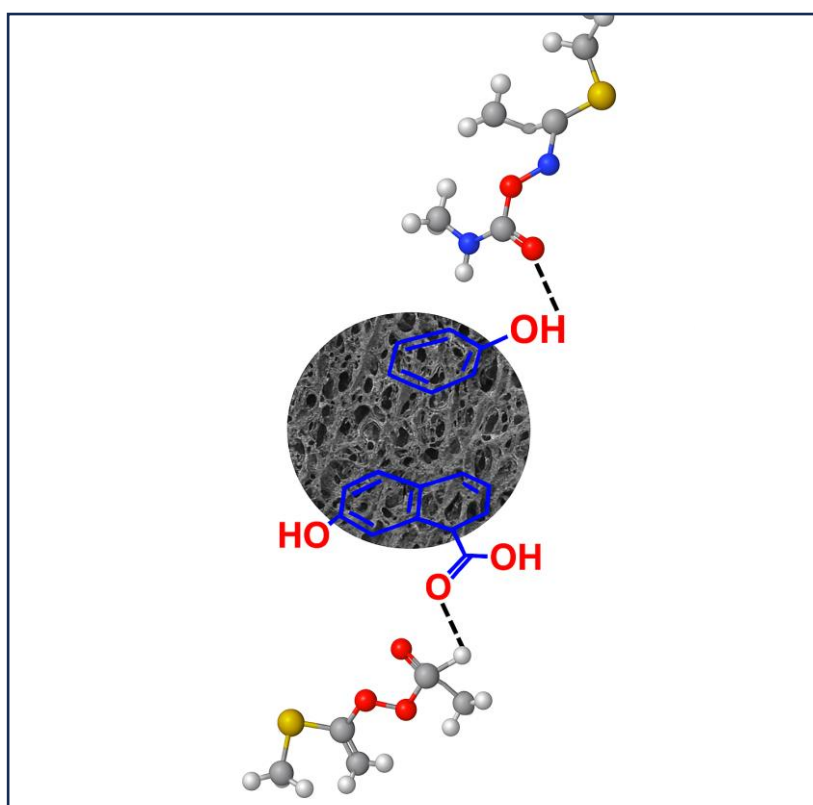
ตัวของรูปทรง ความสามารถในการเข้าถึงของโมเลกุลเมโรมิลในด้านอื่น และกลไกทางเคมี (Chen et al., 2018)

4.2.7.2 กลไกทางเคมี

กลไกการดูดซับของเมโรมิลบนไบโอชาร์ในงานวิจัยนี้ควบคุมโดยปฏิกิริยาเคมี ซึ่งสอดคล้องกับแบบจำลองจลนพลศาสตร์ลำดับที่สองที่ให้ความ R^2 สูงสุดในทุกตัวอย่าง สามารถอธิบายได้จากกลไกที่เกิดขึ้น เช่น พันธะไฮโดรเจน ปฏิกิริยาไฟฟ้าสถิต π - π Interaction และอธิบายได้จากผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบเชิงธาตุจาก CHNS พื้นที่ผิวจำเพาะจาก BET ลักษณะทางกายภาพจาก SEM กลุ่มฟังก์ชันจาก FTIR และค่าประจุพื้นผิว ซึ่งทั้งหมดนี้ร่วมกันชี้ให้เห็นถึงการมีอยู่ของกระบวนการดูดซับที่ควบคุมโดยปฏิกิริยาเคมี

1) พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bonding)

ผลการวิเคราะห์สเปกตรัม FTIR แสดงให้เห็นว่าไบโอชาร์ทั้งสามชนิดมีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถจับกับกลุ่มขั้วของเมโรมิลผ่านพันธะไฮโดรเจน ได้แก่ -OH -COOH และ P=O โดยเฉพาะในไบโอชาร์ที่ดัดแปลงด้วยกรดฟอสฟอริก (BHP) พบว่ามีสัญญาณของพันธะ P-OH P-O-C และ P=O ปรากฏอย่างชัดเจน (Peng et al., 2017) ซึ่งมีความสามารถในการจับกับกลุ่ม C=O และ N-H ของเมโรมิลตามกลไกของการเกิดพันธะไฮโดรเจน (Sari et al., 2024)



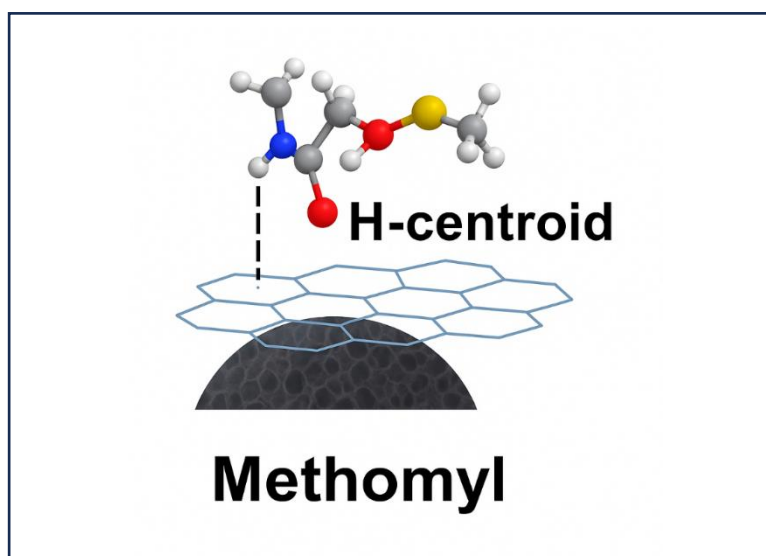
รูปที่ 4.21 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธะไฮโดรเจน บนพื้นผิวของไบโอชาร์ กับโมเลกุลของเมโรมิล ดัดแปลงจาก Srikaow et al., (2022)

2) ปฏิสัมพันธ์ไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Interaction)

ผลการวิเคราะห์ค่าประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ พบว่า BNS มีค่าประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ต่ำที่สุดในสามชนิดเท่ากับ 2.60 ซึ่งบ่งชี้ว่าเมื่ออยู่ในสารละลายที่มีพีเอชสูงกว่า 2.60 ผิวของ BNS จะมีประจุลบ ทำให้เกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้ากับเมโรมีลที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้า (Polar Molecules) ได้ดีขึ้น ซึ่งอธิบายได้ว่าทำไม BNS จึงมีอัตราการดูดซับที่ดีที่สุดในช่วงค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 3 (Yang et al., 2004; Mukherjee et al., 2011)

3) π - π Interaction

จากภาพจำลองในงานของ Srikhaow et al., (2022) แสดงให้เห็นว่าพื้นผิวของไบโอชาร์ที่มีโครงสร้างคาร์บอนอะโรมาติกสามารถเกิดปฏิกิริยา π - π interaction กับหมู่โครงสร้างของเมโรมีลได้ โดยแรงดึงดูดระหว่างวงแหวนอะโรมาติกสองวง เช่น วงแหวนเบนซีนบนพื้นผิวของไบโอชาร์กับวงแหวนไพริดีนของสารกำจัดศัตรูพืช แต่สำหรับเมโรมีลมีหมู่ N-H ซึ่งถึงแม้ไม่ใช่วงแหวน แต่สามารถมีบทบาทในปฏิสัมพันธ์ผ่านกลไกกับกลุ่มฟังก์ชันเหล่านี้ได้



รูปที่ 4.22 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างสารประกอบอะโรมาติกที่พบในไบโอชาร์และโมเลกุลของสารกำจัดศัตรูพืชผ่านกลไกการเกิดปฏิสัมพันธ์แบบ π - π ดัดแปลงจาก Srikhaow et al., (2022)