

การสังเคราะห์ไบโอชาร์จากเหง้ามันสำปะหลังสำหรับการดูดซับสารเมโทมิล



นางสาวลลิตา กมลกลาง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมระบบอุตสาหกรรมและสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2567

SYNTHESIS OF CASSAVA RHIZOME BIOCHAR FOR METHOMYL
ADSORPTION



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Industrial Systems and Environmental Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2024

การส่งเคราะห์ไปไอชาร์จากแห่งำม่นสำปะหล่งสำหรับการดูตซ์บสารเมโรมล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้หน่วยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

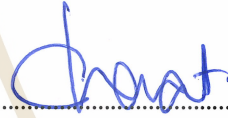
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย วิจิตรเสถียร)
ประธานกรรมการ



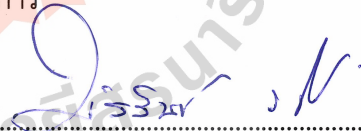
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิชน วิชเรนทร์วงศ์)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



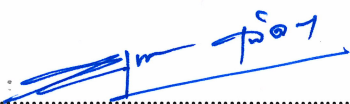
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชนัดต์ โชคเจริญรัตน์)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม)



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชาติพิทย์ สิ้นยัง)
กรรมการ



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พัชรินทร์ ราชไ)
กรรมการ



(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รองศาสตราจารย์ ดร.พรศิริ จงกล)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ลลิตา กมลกลาง : การสังเคราะห์ไบโอชาร์จากเหง้ามันสำปะหลังสำหรับการดูดซับสารเมโทมิล (SYNTHESIS OF CASSAVA RHIZOME BIOCHAR FOR METHOMYL ADSORPTION)

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิชน วัชรนทร์วงศ์, 96 หน้า.

คำสำคัญ : ไบโอชาร์, เมโทมิล, เหง้ามันสำปะหลัง, กรดฟอสฟอริก, โซเดียมเมตาซิลิเกต

ไบโอชาร์เป็นผลิตภัณฑ์ที่อุดมไปด้วยคาร์บอนซึ่งได้จากกระบวนการแปรรูปชีวมวลผ่านกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) หรือการให้ความร้อนในสภาวะไร้ออกซิเจน ซึ่งสอดคล้องกับสถานการณ์ปัจจุบันของประเทศไทยที่เผชิญกับปัญหาขยะจากเศษวัสดุทางการเกษตร ซึ่งเหง้ามันสำปะหลังเป็นของเหลือทิ้งที่ยังไม่ได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างมีประสิทธิภาพ การนำเศษวัสดุเหล่านี้มาใช้ผลิตเป็นไบโอชาร์จึงเป็นแนวทางที่ช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมจากของเสียทางการเกษตร และยังได้วัสดุที่สามารถประยุกต์ใช้ในด้านเกษตรและสิ่งแวดล้อม เช่น เป็นวัสดุปรับปรุงดินเพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน รวมถึงเป็นวัสดุสำหรับการดูดซับมลพิษในแหล่งน้ำ ซึ่งเป็นแนวทางที่มีศักยภาพในการจัดการทรัพยากรอย่างยั่งยืน ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้คือการศึกษาระยะเวลาในการสังเคราะห์ไบโอชาร์จากเหง้ามันสำปะหลัง และเพื่อศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการดูดซับสารเมโทมิลด้วยไบโอชาร์ ในการสังเคราะห์ไบโอชาร์มีปัจจัยที่ทำการศึกษาดังนี้ ระยะเวลาในการไพโรไลซิส (0.5 ถึง 2.5 ชั่วโมง) อุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิส (300 ถึง 500 องศาเซลเซียส) ภายใต้สภาวะแก๊สไนโตรเจน และทำการเลือกไบโอชาร์ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติด้วยเทคนิคต่าง ๆ ได้แก่ การวิเคราะห์องค์ประกอบคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจน (CHNS) และการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรสโกปี (FTIR) ผลการศึกษาพบว่า ไบโอชาร์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 2.5 ชั่วโมง มีปริมาณคาร์บอน 78.149 เปอร์เซ็นต์ และอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C) อยู่ที่ 0.0261 ซึ่งใกล้เคียงกับงานวิจัยอื่นที่ระบุว่า ไบโอชาร์ที่มีคุณภาพสูงจะมีปริมาณคาร์บอนเสถียร อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนต่ำ และปริมาณคาร์บอนที่สูงจะส่งผลให้ไบโอชาร์มีความเสถียรมากขึ้นตามลำดับ จากนั้นไบโอชาร์ที่สังเคราะห์ได้จากเหง้ามันสำปะหลังที่คัดเลือกจะถูกนำไปดัดแปลงด้วยโซเดียมซิลิเกต และกรดฟอสฟอริก จากนั้นนำไบโอชาร์ที่สังเคราะห์ได้สามชนิด คือ ไบโอชาร์จากเหง้ามันสำปะหลัง (BCA) ไบโอชาร์จากเหง้ามันสำปะหลังที่ดัดแปลงด้วยโซเดียมซิลิเกต (BNS) และไบโอชาร์จากเหง้ามันสำปะหลังที่ดัดแปลงด้วยกรดฟอสฟอริก (BHP) นำไปศึกษาการดูดซับเมโทมิล และผลการศึกษาการดูดซับเมโทมิลด้วยไบโอชาร์ พบว่าไบโอชาร์ทุกตัวอย่างเข้าสู่สมดุลที่เวลาประมาณ 1440 นาที และความเร็วรอบของการเขย่ามีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับของไบโอชาร์ โดยเฉพาะไบโอชาร์ที่ผ่านการดัดแปลง ซึ่งมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อความเร็วรอบเท่ากับ 200 รอบต่อนาที เนื่องจากความเร็วรอบช่วยเพิ่มการกระจายตัวของสารละลายและการเข้าถึงพื้นผิวของไบโอชาร์ สำหรับค่าความเป็นกรดต่างจะเลือกใช้ในช่วง 5.5 ถึง 7 นอกจากนี้ยังมีการตรวจสอบ

หมู่ฟังก์ชันของไบโอชาร์ที่ดัดแปลงด้วยโซเดียมซิลิเกต และกรดฟอสฟอริก พบว่ามีกลุ่มฟังก์ชันไฮดรอกซิล (O-H) หมู่ซิลิกา (Si-O-Si) หมู่ฟอสเฟต (P=O, P=OOH) และหมู่ฟังก์ชันอะโรมาติก (C=C) ซึ่งจัดเป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีความสามารถในการดูดซับสารละลายเมธิลีน ด้วยพันธะไฮโดรเจนและปฏิกิริยาทางอะโรมาติก สำหรับการดัดแปลงไบโอชาร์ด้วยโซเดียมซิลิเกตและกรดฟอสฟอริกช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับสารเมธิลีนได้อย่างชัดเจน โดยผลการวิเคราะห์ไอโซเทอรัมพบว่าแบบจำลองแลงเมียร์ ให้ค่า R^2 ในทุกตัวอย่าง โดย BNS มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด ($q_{max} = 3.12$ มิลลิกรัมต่อกรัม , $R^2 = 0.9813$) และค่า K_L เท่ากับ 0.192 ลิตรต่อมิลลิกรัม สะท้อนถึงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวของตัวดูดซับกับเมธิลีน สำหรับด้านจลนพลศาสตร์การดูดซับ มีค่าความสัมพันธ์ R^2 ของ BCA BNS และ BHP เท่ากับ 0.9995 0.9743 0.9995 ตามลำดับ แสดงว่าทั้งสามตัวอย่างมีความสอดคล้องกับแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม ดังนั้นไบโอชาร์ที่สังเคราะห์จากเหง้ามันสำปะหลังสามารถพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นในการดูดซับสารเมธิลีนได้อย่างชัดเจนผ่านการดัดแปลงด้วยสารเคมี ทั้งในแง่ของโครงสร้างรูพรุน หมู่ฟังก์ชันทางเคมี และคุณสมบัติทางไฟฟ้าสถิตบนพื้นผิว ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับสำหรับบำบัดมลพิษทางน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ



สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา 2567

ลายมือชื่อนักศึกษา.....*คณิศา*
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....*ดร.สุร*
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา (ร่วม).....*ดร.ดร.*

LALITA KAMOLKLANG: SYNTHESIS OF CASSAVA RHIZOME BIOCHAR FOR METHOMYL ADSORPTION.

THESIS ADVISOR: ASST. PROF. APICHON WATCHARENWONG, Ph.D., 96 PP.

Keyword : Biochar, Methomyl, Cassava Rhizome, Phosphoric Acid, Sodium Metasilicate

Biochar is a carbon-rich product derived from the thermal decomposition of biomass through a process known as pyrolysis, which occurs in the absence of oxygen. This approach aligns with the current situation in Thailand, where agricultural waste such as cassava rhizomes is abundant yet underutilized. Converting these residues into biochar offers a promising strategy to mitigate environmental problems related to agricultural waste while producing a valuable material that can be applied in both agricultural and environmental contexts. For example, biochar can be used as a soil amendment to enhance the physical and chemical properties of soil, as well as a sorbent for pollutant removal in water treatment, thereby contributing to sustainable resource management. The objective of this study is to investigate the synthesis parameters of biochar derived from cassava rhizomes and to evaluate its effectiveness in adsorbing methomyl pesticide. The biochar synthesis process was conducted under nitrogen atmosphere, with pyrolysis durations ranging from 0.5 to 2.5 hours and temperatures between 300 and 500°C. The resulting biochars were characterized using various techniques, including CHNS elemental analysis and Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR). Results showed that the biochar produced at 500°C for 2.5 hours exhibited a carbon content of 78.149% and a hydrogen-to-carbon ratio (H/C) of 0.0261. These values are comparable to those reported in other studies, which indicate that high-quality biochar typically has high carbon stability, a low H/C ratio, and high carbon content—features that enhance its long-term stability. The selected biochar was further modified using sodium silicate and phosphoric acid to enhance its adsorption properties. Three types of biochar were studied: unmodified biochar from cassava rhizomes (BCA), biochar modified with sodium silicate (BNS), and biochar modified with phosphoric acid (BHP). All samples were tested for methomyl adsorption. The adsorption equilibrium was reached at approximately 1440 minutes for all biochars. Shaking speed was found to significantly influence adsorption performance, particularly for the modified biochars, with optimal performance observed at 200 rpm. This improvement is attributed to enhanced dispersion and contact between the adsorbent surface and methomyl solution. The optimal pH range for adsorption was found to be 5.5 to 7. FTIR analysis of the

modified biochars revealed the presence of functional groups such as hydroxyl (O-H), siloxane (Si-O-Si), phosphate (P=O, P-OOH), and aromatic (C=C) groups. These functional groups facilitate methomyl adsorption through hydrogen bonding and aromatic interactions. The chemical modifications using sodium silicate and phosphoric acid significantly improved the adsorption capacity. According to isotherm analysis, all samples followed the Langmuir model, with BNS exhibiting the highest adsorption capacity ($q_{\max} = 3.12 \text{ mg/g}$, $R^2 = 0.9813$) and a Langmuir constant (KL) of 0.192 L/mg, indicating a strong affinity between the biochar surface and methomyl molecules. In terms of adsorption kinetics, the pseudo-second-order model provided the best fit for all samples, with R^2 values of 0.9995 for BCA, 0.9743 for BNS, and 0.9995 for BHP. These findings confirm that cassava rhizome-derived biochar can be significantly enhanced through chemical modification to effectively adsorb methomyl, owing to improvements in pore structure, surface chemistry, and electrostatic surface properties. Therefore, such biochar materials have great potential for use as efficient adsorbents in water pollution treatment.



School of Environmental Engineering
Academic Year 2024

Student's Signature *อลิษา*
Advisor's Signature *อลิษา*
Co-Advisor's Signature *ชวาล*

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ก็ด้วยความกรุณา ความเมตตา และการสนับสนุนจากหลายท่าน ซึ่งล้วนมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งในทุกขั้นตอนของการศึกษา การทำวิจัย และการใช้ชีวิต ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณจากใจจริงต่อทุกท่าน ดังต่อไปนี้

ก่อนอื่นข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิชน วัชเรนทร์วงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.ชนันต์ โชคเจริญรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่กรุณา มอบคำแนะนำทั้งในด้านการศึกษาและในด้านการใช้ชีวิต ชี้แนะแนวทางการแก้ไขปัญหาในแต่ละขั้นตอน ทั้งยังให้กำลังใจและเป็นแรงผลักดันที่สำคัญให้ข้าพเจ้าก้าวอุปสรรคในการทำวิจัยครั้งนี้

ข้าพเจ้าขอแสดงความขอบพระคุณอย่างสูงต่อ รองศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย วิจิตรเสถียร ในฐานะประธานกรรมการสอบ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธาทิพย์ สิ้นยัง และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พัชรินทร์ ราโช ในฐานะกรรมการสอบ ที่กรุณาสละเวลามาร่วมประเมิน และช่วยพิจารณา เสนอแนะแนวทางในการปรับปรุงงานวิจัยซึ่งช่วยให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยณรงค์ สกกุลแถว ภาควิชาการพยาบาลทางสัตวแพทย์ คณะเทคนิคการสัตวแพทย์ และรองศาสตราจารย์ ดร.ชนันต์ โชคเจริญรัตน์ ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อมมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ รวมถึงนักวิทยาศาสตร์ประจำ ห้องปฏิบัติการทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุนด้วยความจริงใจ ทั้งในด้านองค์ความรู้ อุปกรณ์วิจัย สถานที่ และความสบายใจในการทำวิจัย จนข้าพเจ้าสามารถดำเนินการทดลองได้อย่างราบรื่นและมีความสุข

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ วิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี รวมถึงเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลือด้วยความเต็มใจทุกครั้งข้าพเจ้าขอความร่วมมือ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่เอื้อเฟื้อทรัพยากร สถานที่ และบรรยากาศแห่งการเรียนรู้ ตลอดจนขอขอบคุณบริษัทอุตสาหกรรมเอี่ยมรุ่งเรืองที่สนับสนุนวัสดุที่สำคัญคือ “เหง้ามันสำปะหลัง” ซึ่งมีส่วนสำคัญต่อความสำเร็จของงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ที่แวะเวียนเข้ามาให้กำลังใจช่วยเหลือข้าพเจ้า ทุกช่วงเวลาของการทำวิจัยครั้งนี้ เพื่อนๆ ล้วนเป็นพลังบวกที่ทำให้ข้าพเจ้ารู้สึกอบอุ่น ไม่โดดเดี่ยว และมีกำลังใจในการทำวิจัยครั้งนี้

และท้ายที่สุดข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดาและมารดา ผู้เป็นรากฐานของชีวิตและสนับสนุนทางการเงิน การศึกษา และอบรมเลี้ยงดูด้วยความรักและเสียสละมาโดยตลอด ขอขอบคุณครอบครัวที่สนับสนุนทั้งด้านกำลังใจ ด้านคำแนะนำในการใช้ชีวิต และอยู่เคียงข้างเสมอไม่ว่าในยามสุขหรือยามท้อ รวมถึง เพื่อน ๆ และทุกคนที่อยู่เบื้องหลัง ผู้ส่งแรงใจและคำปลอบโยนในยามที่ข้าพเจ้ารู้สึกหมดกำลังใจ ทุกคำพูดและการสนับสนุนเล็กๆ น้อยๆ เหล่านั้น ล้วนหล่อหลอมให้ข้าพเจ้ามีกำลังใจจนสามารถประสบความสำเร็จ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณจากใจอีกครั้ง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 สมมติฐานงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ปรีทศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 สารกำจัดศัตรูพืช (Pesticide).....	4
2.2 สารคาร์บาเมท (Carbamate).....	6
2.3 เมโทมิล (Methomyl).....	7
2.3.1 คุณสมบัติที่มีผลต่อการเคลื่อนย้ายของเมโทมิล.....	8
2.3.2 พฤติกรรมของเมโทมิลในดิน.....	8
2.3.3 พฤติกรรมของเมโทมิลในน้ำ.....	8
2.3.4 ความเป็นพิษของเมโทมิล.....	9
2.3.5 ค่ามาตรฐานการปนเปื้อนของเมโทมิล.....	9
2.4 การดูดซับ (Adsorption).....	9
2.4.1 ประเภทของการดูดซับ.....	10
2.4.2 สมการไอโซเทิร์มของการดูดซับ (Adsorption Isotherm Equations).....	12
2.4.3 จลนพลศาสตร์การดูดซับ (Adsorption Kinetics).....	15
2.5 ไบโอชาร์ (Biochar).....	16
2.5.1 คุณสมบัติของไบโอชาร์.....	16
2.5.2 กลไกการดูดซับสารปนเปื้อนของไบโอชาร์.....	17

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5.3	การใช้ไบโอชาร์ในด้านสิ่งแวดล้อม	20
2.6	กระบวนการสังเคราะห์ไบโอชาร์	21
2.6.1	ไพโรไลซิสแบบช้า (Slow Pyrolysis).....	22
2.6.2	ไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast Pyrolysis).....	22
2.6.3	ผลกระทบของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อคุณสมบัติของไบโอชาร์	23
2.7	เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของไบโอชาร์ (Biochar Yield %).....	23
2.8	คุณสมบัติของเหง้ามันสำปะหลัง	24
2.9	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	24
2.9.1	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ไบโอชาร์จากชีวมวล	24
2.9.2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับสารปราบศัตรูพืชด้วยไบโอชาร์.....	27
3	การศึกษาดำเนินงาน.....	29
3.1	สารเคมี เครื่องมือ และอุปกรณ์.....	29
3.1.1	สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	29
3.1.2	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	30
3.2	การสังเคราะห์ไบโอชาร์จากเหง้ามันสำปะหลัง	30
3.2.1	การเตรียมวัสดุชีวมวลจากเหง้ามันสำปะหลัง.....	30
3.2.2	การสังเคราะห์ไบโอชาร์จากเหง้ามันสำปะหลัง.....	31
3.2.3	การดัดแปลงไบโอชาร์ด้วยโซเดียมซิติเลต.....	32
3.2.4	การดัดแปลงไบโอชาร์ด้วยกรดฟอสฟอริก.....	32
3.3	การบำบัดสารเมไธมิล.....	33
3.3.1	การเตรียมสารละลายเมไธมิล	33
3.3.2	การศึกษาปัจจัยในการบำบัดสารเมไธมิล	34
3.4	การวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของสารเมไธมิล	39
4	ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	40
4.1	ผลการศึกษาคุณลักษณะสมบัติของไบโอชาร์.....	40
4.1.1	ลักษณะทางกายของไบโอชาร์จากเหง้ามันสำปะหลัง	40
4.1.2	เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของไบโอชาร์ (Biochar Yield %).....	42
4.1.3	เทคนิควิเคราะห์ธาตุ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ (CHNS)....	43
4.1.4	เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FTIR)	45
4.1.5	เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	50

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.1.6	เทคนิคการถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์สามมิติระดับจุลภาคด้วยเอกซเรย์ ย่านพลังงานสูงจากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอน (XTM).....	52
4.1.7	เทคนิควิเคราะห์หาพื้นที่และความพรุนของอนุภาค (BET).....	53
4.1.8	เทคนิคการวิเคราะห์ค่าประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ (pH_{pzc}).....	54
4.2	ผลการศึกษาผลการบำบัดเมไธมิล	57
4.2.1	ผลการศึกษาระยะเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการดูดซับ	57
4.2.2	ผลของค่าความเร็วรอบต่อประสิทธิภาพการดูดซับ	58
4.2.3	ผลของค่าความเป็นกรดต่างต่อประสิทธิภาพการดูดซับ	61
4.2.4	ผลของน้ำหนักรวบรวมต่อประสิทธิภาพการดูดซับ	62
4.2.5	ผลการศึกษาไอโซเทิร์มของการดูดซับสำหรับการดูดซับสารเมไธมิล ของไบโอชาร์	63
4.2.6	ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์สำหรับการดูดซับสารเมไธมิลของไบโอชาร์.....	66
4.2.7	กลไกการดูดซับสารเมไธมิลของไบโอชาร์.....	68
5	สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ.....	71
5.1	สรุปผลการวิจัย	71
5.1.1	สรุปคุณสมบัติของไบโอชาร์จากเหง้ามันสำปะหลัง	71
5.1.2	สรุปผลการศึกษาผลการบำบัดเมไธมิล.....	72
5.1.3	ไอโซเทิร์มและจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ	72
5.2	ข้อเสนอแนะ	73
	รายการอ้างอิง.....	74
	ภาคผนวก	
	ก การดูดซับสารเมไธมิลของไบโอชาร์.....	80
	ข รูปประกอบการสังเคราะห์ไบโอชาร์จากเหง้ามันสำปะหลัง	84
	ค บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา	87
	ประวัติผู้เขียน	96

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ปริมาณการนำเข้าวัตถุดิบทรายทางการเกษตรของประเทศไทยปี 2562-2566	5
2.2	สารกำจัดศัตรูพืชและความเป็นพิษที่ต้องเฝ้าระวัง 12 ชนิด	5
2.3	อาการและความรุนแรงของการเกิดพิษของสารกลุ่มคาร์บาเมท	6
2.4	คุณลักษณะของสารเมโทมิล (Methomyl)	7
2.5	ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพ และทางเคมี	12
2.6	คุณสมบัติของไบโอชาร์	17
2.7	ประเภทของการไฟโรไลซิส	22
2.8	คุณสมบัติของเข้้ำมันสำปะหลัง	24
2.9	การสังเคราะห์ไบโอชาร์จากชีวมวล	26
2.10	การดูดซับสารเคมีปราบศัตรูพืชด้วยไบโอชาร์	28
3.1	สถานะในการศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับสารเมโทมิลของไบโอชาร์	35
3.2	สถานะในการศึกษาผลของความเร็วยวต่อการดูดซับสารเมโทมิลของไบโอชาร์	36
3.3	สถานะในการศึกษาผลค่าความเป็นกรดต่าง ต่อการดูดซับสารเมโทมิลของไบโอชาร์	37
3.4	สถานะในการศึกษาผลของน้ำหนักวัสดุต่อการดูดซับสารเมโทมิลของไบโอชาร์	38
3.5	การวิเคราะห์เมโทมิลโดยเทคนิควิเคราะห์สารด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟีชนิดของเหลว สมรรถนะสูง	39
4.1	ลักษณะรูปทางกายภาพการสังเคราะห์ไบโอชาร์จากเข้้ำมันสำปะหลังที่อุณหภูมิต่าง ๆ	42
4.2	ปริมาณธาตุองค์ประกอบของไบโอชาร์	44
4.3	ลักษณะการสันสเทือนและฟังก์ชันการทำงานไบโอชาร์จากเข้้ำมันสำปะหลัง	48
4.4	ลักษณะการสันสเทือนและฟังก์ชันการทำงานของไบโอชาร์จากเข้้ำมันสำปะหลัง ที่ดัดแปลงด้วยโซเดียมซลิเกต	49
4.5	ลักษณะการสันสเทือนและฟังก์ชันการทำงานไบโอชาร์จากเข้้ำมันสำปะหลัง ที่ดัดแปลงด้วยกรดฟอสฟอริก	50
4.6	คุณสมบัติทางกายของไบโอชาร์	54
4.7	ค่าคงที่และความสามารถในการดูดซับสารเมโทมิลของไบโอชาร์ทั้ง 3 ชนิด ใช้ไอโซเทอรั่ม การดูดซับแบบ Langmuir Freundlich และแบบ Temkin	64
4.8	ค่าคงที่และความสามารถในการดูดซับสารเมโทมิลของไบโอชาร์ทั้ง 3 ชนิด ใช้จลนพลศาสตร์ การดูดซับแบบ Pseudo-First-Order และแบบ Pseudo-Second-Order	67

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	สูตรโครงสร้างทั่วไปของสารเคมีกำจัดแมลงกลุ่มคาร์บาเมท.....	6
2.2	ลักษณะกลไกการดูดซับสารปนเปื้อนของไบโอชาร์	17
2.3	ชนิดของรูพรุนไบโอชาร์	18
2.4	กลไกการดูดซับโดยพันธะไฮโดรเจน.....	20
2.5	ผลกระทบของอุณหภูมิในการไพโรไลซิสต่อโครงสร้างของไบโอชาร์	23
3.1	วิธีการเตรียมวัสดุชีวมวลจากเห้งน้ำมันสำปะหลัง	31
3.2	วิธีการสังเคราะห์ไบโอชาร์จากเห้งน้ำมันสำปะหลัง.....	31
3.3	วิธีการการดัดแปลงไบโอชาร์ด้วยโซเดียมซิลิเกต	32
3.4	วิธีการการดัดแปลงไบโอชาร์ด้วยกรดฟอสฟอริก.....	33
3.5	วิธีเตรียมสารละลายเมไธมิล.....	34
3.6	การเตรียมสารละลายเมไธมิล.....	34
3.7	แผนผังการศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับสารเมไธมิลของไบโอชาร์	35
3.8	แผนผังการศึกษาผลของความเร็วรอบในการกวนต่อการดูดซับสารเมไธมิลของไบโอชาร์ ...	36
3.9	แผนผังการศึกษาผลของค่าความเป็นกรดต่างต่อการดูดซับสารเมไธมิลของไบโอชาร์	37
3.10	แผนผังการศึกษาผลของน้ำหนักวัสดุต่อการดูดซับสารเมไธมิลของไบโอชาร์	38
4.1	เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของไบโอชาร์จากเห้งน้ำมันสำปะหลังที่ไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 400 และ 500 องศาเซลเซียส	43
4.2	รูปแบบ FTIR bands ของ BCA.....	46
4.3	รูปแบบ FTIR bands ของ BNS.....	46
4.4	รูปแบบ FTIR bands ของ BHP	47
4.5	ภาพถ่าย SEM ของ BCA BNS BHP	52
4.6	ภาพถ่ายเอกซเรย์คอมพิวเตอร์สามมิติของไบโอชาร์จากเห้งน้ำมันสำปะหลัง	53
4.7	ผลค่าประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ของ BCA.....	55
4.8	ผลค่าประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ของ BNS	56
4.9	ผลค่าประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ของ BHP	56
4.10	ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับสารเมไธมิล	58
4.11	ผลของความเร็วรอบต่อการดูดซับสารเมไธมิล (BCA).....	59
4.12	ผลของความเร็วรอบต่อการดูดซับสารเมไธมิล (BNS).....	60
4.13	ผลของความเร็วรอบต่อการดูดซับสารเมไธมิล (BHP).....	60

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14	ผลของค่าความเป็นกรดต่างต่อการดูดซับสารเมไธมิล 62
4.15	ผลของค่าน้ำหนักวัสดุดูดซับการดูดซับสารเมไธมิล 63
4.16	ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ของการดูดซับสารเมไธมิลของไบโอชาร์ ทั้งสามชนิด BCA BNS BHP 64
4.17	ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบฟรอนด์ลิชของการดูดซับสารเมไธมิลของไบโอชาร์ ทั้งสามชนิด BCA BNS BHP 65
4.18	ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบเทมคินของการดูดซับสารเมไธมิลของไบโอชาร์ ทั้งสามชนิด BCA BNS BHP 65
4.19	จลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเทียมของการดูดซับสารเมไธมิลของไบโอชาร์ ทั้งสามชนิด BCA BNS BHP 67
4.20	จลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียมของการดูดซับสารเมไธมิลของการดูดซับ สารเมไธมิลของไบโอชาร์ BCA BNS BHP 68
4.21	ปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธะไฮโดรเจนบนพื้นผิวของไบโอชาร์ 69
4.22	ปฏิสัมพันธ์ระหว่างสารประกอบอะโรมาติกที่พบในไบโอชาร์ 70



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในปัจจุบันภาคการเกษตรของประเทศไทยมีการใช้สารกำจัดศัตรูพืชกันอย่างแพร่หลายไม่ว่าจะเป็นกลุ่มออร์กาโนคลอรีน กลุ่มออร์กาโนฟอสเฟต และกลุ่มคาร์บาเมท แต่ในปัจจุบันสำหรับสารกลุ่มออร์กาโนคลอรีน ถูกประกาศยกเลิกการใช้งานแล้ว เนื่องจากเป็นสารที่มีฤทธิ์ตกค้างนานและสามารถสะสมในสิ่งแวดล้อม ส่งผลให้เกษตรกรหันมาใช้สารกำจัดศัตรูพืชกลุ่มออร์กาโนฟอสเฟตและคาร์บาเมทที่มีไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบหลัก (ภูสิต ปุกมณี, 2558) ในการใช้สารกำจัดศัตรูพืชในภาคการเกษตรจะส่งผลให้เกิดการสะสมของสารกำจัดศัตรูพืชในดิน เมื่อสารกำจัดศัตรูพืชสะสมจนเกินสภาวะอิ่มตัว ส่งผลให้ดินเกิดการคายซับเกิดขึ้นทำให้สารเคมีถูกชะล้างด้วยกระบวนการชะล้างของฝนออกจากดินลงไปสู่แหล่งน้ำธรรมชาติและแหล่งน้ำใต้ดิน (Zhao et al., 2013) สารกำจัดศัตรูพืชที่ปนเปื้อนตามแหล่งน้ำธรรมชาติสามารถสะสมในห่วงโซ่อาหารของสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำได้ ส่งผลให้เพิ่มความเสี่ยงต่อสุขภาพของมนุษย์ สารกำจัดศัตรูพืชชนิดคาร์บาเมทมักใช้ในภาคการเกษตรโดยคาร์บาเมทมีค่าการละลายน้ำที่สูง ซึ่งเมโทมิล (Methomyl) เป็นสารหนึ่งในชนิดของสารคาร์บาเมท มีการใช้เมโทมิลกับพืชเศรษฐกิจหลากหลายชนิด เช่น ข้าวโพด อ้อย มันสำปะหลัง เพื่อป้องกันความเสียหายจากสัตว์จำพวกแมลง นอกจากนี้ยังพบเมโทมิลในสิ่งแวดล้อม เช่น น้ำบาดาล น้ำผิวดิน โดยพบในน้ำบาดาลอยู่ที่ 10 ไมโครกรัมต่อลิตร และน้ำผิวดินอยู่ที่ 30 ไมโครกรัมต่อลิตร มาตรฐานของสารกำจัดศัตรูพืชแต่ละตัวในดินและน้ำผิวดินควรมีค่าไม่เกิน 0.1 ไมโครกรัมต่อลิตร หากมีค่าสูงกว่าหนึ่งชนิด ความเข้มข้นรวมของยาฆ่าแมลงทั้งหมดไม่ควรเกิน 0.5 ไมโครกรัมต่อลิตร ตามมาตรฐานที่กำหนดโดยสหภาพยุโรป (EU) กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำดื่มไว้ในคำสั่งปี 2020/2184 (Srikhaow et al., 2022) อย่างไรก็ตามปริมาณที่พบเมโทมิลยังคงสูงกว่ามาตรฐาน จึงทำให้ในงานวิจัยนี้สนใจการบำบัดเมโทมิล โดยจากการศึกษาของงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการใช้เทคโนโลยีในการบำบัดเมโทมิลด้วยหลากหลายเทคนิค เช่น กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง การกรองเมมเบรน การย่อยสลายด้วยแสง และการดูดซับ ซึ่งการดูดซับนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการบำบัดสารกำจัดศัตรูพืชจากแหล่งน้ำ เนื่องจากขั้นตอนการทำงานง่ายและราคาไม่แพง (Suo et al., 2019) วัสดุที่ใช้ในการดูดซับมีให้เลือกหลายชนิด เช่น ถ่านกัมมันต์ ซีโอไลต์ ชาร์โคล ไบโอบีโอสอร์ เป็นต้น

ซึ่งในปัจจุบันได้มีงานวิจัยที่นำไบโอบีโอสอร์มาเป็นวัสดุดูดซับ เนื่องจากไบโอบีโอสอร์เป็นผลิตภัณฑ์ที่อุดมด้วยคาร์บอนซึ่งใช้เป็นตัวดูดซับ โดยพื้นผิวทางกายภาพ และคุณสมบัติทางเคมีของไบโอบีโอสอร์เป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อกระบวนการดูดซับ เพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนในแหล่งน้ำ มีการใช้ประโยชน์ในภาคการเกษตร (Aup-Ngoen & Noipitak, 2020) นอกจากนี้ยังมีพื้นที่ผิวรูพรุน ซึ่งเป็นคุณสมบัติของวัสดุดูดซับและยังมีหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวที่มีคุณสมบัติที่ช่วยส่งเสริมในการดูดซับ (อนัญญา จีระโร, 2024) มีการศึกษาการสังเคราะห์ไบโอบีโอสอร์ และการดูดซับสารกำจัดศัตรูพืชโดยใช้ไบโอบีโอสอร์ เช่น

การศึกษาการสังเคราะห์ไบโอซาร์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรได้แก่ เหง้ามันสำปะหลัง เปลือกทุเรียน เปลือกสับปะรด และซังข้าวโพด โดยจากการศึกษาการพบว่าเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนที่คงที่ในวัตถุดิบชีวมวลอยู่ระหว่าง 11.91 เปอร์เซ็นต์ ถึง 17.51 เปอร์เซ็นต์ โดยเหง้ามันสำปะหลังให้เปอร์เซ็นต์คาร์บอนสูงที่สุด ถือว่าเป็นวัตถุดิบตั้งต้นที่สามารถนำมาผลิตไบโอซาร์ได้ (Aup-Ngoen & Noipitak, 2020) และมีงานวิจัยของ Mandal et al., 2017 ทำการศึกษาเกี่ยวกับการใช้ไบโอซาร์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและมีการตัดแปลงไบโอซาร์ด้วยกรดฟอสฟอริก สำหรับดูดซับอาหารซิน (Atrazine) และอิมิดาโคลพริด (Imidacloprid) ซึ่งแสดงการดูดซับสูงสุดของอาหารซินอยู่ที่ 58.9-89.8 เปอร์เซ็นต์ และอิมิดาโคลพริดอยู่ที่ 58.2-89.5 เปอร์เซ็นต์ การตัดแปลงไบโอซาร์ด้วยกรดฟอสฟอริกช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับของสารกำจัดศัตรูพืชทั้งสองชนิด

ดังนั้นในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาการสังเคราะห์ไบโอซาร์จากเหง้ามันสำปะหลังที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร และศึกษาปัจจัยต่างๆ ในการดูดซับเมธิลด้วยไบโอซาร์จากเหง้ามันสำปะหลังที่สังเคราะห์ขึ้น ไบโอซาร์ที่สังเคราะห์ได้จะถูกนำไปเป็นวัสดุดูดซับสำหรับนำไปกำจัดเมธิลที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำด้วยกระบวนการดูดซับ ซึ่งเป็นวิธีที่ดำเนินการง่าย และมีประสิทธิภาพในการช่วยลดปัญหามลพิษที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำธรรมชาติ

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาปัจจัยในการสังเคราะห์ไบโอซาร์จากเหง้ามันสำปะหลัง
- 1.2.2 เพื่อศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการดูดซับเมธิลด้วยไบโอซาร์จากเหง้ามันสำปะหลัง

1.3 ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นศึกษาการสังเคราะห์ไบโอซาร์จากเหง้ามันสำปะหลังโดยนำมาตัดแปลงด้วยโซเดียมซัลไฟด์ และกรดฟอสฟอริก เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับเมธิล การทดลองส่วนแรกเป็นการสังเคราะห์ไบโอซาร์จากเหง้ามันสำปะหลัง ไบโอซาร์จากเหง้ามันสำปะหลังที่ตัดแปลงด้วยโซเดียมซัลไฟด์ และไบโอซาร์จากเหง้ามันสำปะหลังที่ตัดแปลงด้วยกรดฟอสฟอริก การทดลองส่วนที่สองเป็นการบำบัดเมธิลด้วยการดูดซับโดยใช้ไบโอซาร์ที่สังเคราะห์ขึ้นเองทั้งสามชนิด ซึ่งมีขอบเขตในการศึกษาดังนี้

- 1.3.1 ใช้เหง้ามันสำปะหลังพันธุ์เกษตรศาสตร์ห้าสิบ
- 1.3.2 ทำการศึกษาปัจจัยในกระบวนการผลิตไบโอซาร์ ได้แก่ อุณหภูมิ ระยะเวลาในการไพโรไลซิส
- 1.3.3 ทำการศึกษาการตัดแปลงไบโอซาร์จากเหง้ามันสำปะหลังด้วยกรดฟอสฟอริก และโซเดียมซัลไฟด์
- 1.3.4 ทำการศึกษาปัจจัยในกระบวนการดูดซับเมธิล ได้แก่ ระยะเวลาสัมผัส ความเร็วรอบในการกวน ค่าความเป็นกรดต่างในการดูดซับ และน้ำหนักวัสดุดูดซับไบโอซาร์

1.4 สมมุติฐานของงานวิจัย

ไบโอชาร์ที่สังเคราะห์จากเหง้ามันสำปะหลังและผ่านการดัดแปลงด้วยสารเคมีจะมีหมู่ฟังก์ชันจำเพาะและลักษณะโครงสร้างรูพรุนที่เหมาะสมในการดูดซับเมธิลสูงกว่าไบโอชาร์ที่ไม่ได้รับการดัดแปลง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการสังเคราะห์และการดัดแปลงไบโอชาร์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ได้แก่ เหง้ามันสำปะหลัง ซึ่งสามารถนำไปต่อยอดเป็นวัสดุดูดซับทางเลือกในการบำบัดสารปนเปื้อนในแหล่งน้ำ

1.5.2 ได้ข้อมูลเชิงกลไกเกี่ยวกับโครงสร้างรูพรุนและหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่มีผลต่อการดูดซับสารเคมีปราบศัตรูพืช โดยเฉพาะเมธิล ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบวัสดุที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับ

1.5.3 ได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของไบโอชาร์ชนิดต่าง ๆ ทั้งที่ไม่ได้ดัดแปลงและที่ผ่านการดัดแปลงด้วยสารเคมี เพื่อเลือกวัสดุดูดซับที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการบำบัดเมธิลในสภาวะแวดล้อมจริง

1.5.4 ลดผลกระทบจากการปนเปื้อนของเมธิลในแหล่งน้ำธรรมชาติ และเป็นแนวทางในการพัฒนาเทคโนโลยีที่เรียบง่าย ประหยัด และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สำหรับการบำบัดสารเคมีในภาคการเกษตร

บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สารกำจัดศัตรูพืช (Pesticides)

สารเคมีกำจัดศัตรูพืช (Pesticide) หมายถึง สารเคมีหรือส่วนผสมของสารเคมีที่มีวัตถุประสงค์สำหรับการฆ่า การป้องกัน การทำลาย และการควบคุมต่อศัตรูพืช ซึ่งในทางกฎหมายสารเคมีกำจัดศัตรูพืชทุกชนิดจัดเป็นวัตถุอันตรายตามพระราชบัญญัติวัตถุอันตราย พ.ศ.2535 จึงจำเป็นต้องมีมาตรการควบคุมการผลิต นำผ่าน นำเข้า ส่งออก และบางชนิดต้องมีการขออนุญาตเพื่อจะมีไว้ในครอบครอง (กรมควบคุมโรค, 2556)

สารเคมีกำจัดศัตรูพืชในทางการเกษตรสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ ๆ ได้ทั้งหมด 4 ชนิด ได้แก่

- 1) สารเคมีกำจัดแมลง (Insecticide)
- 2) สารเคมีป้องกันกำจัดวัชพืช (Herbicide)
- 3) สารเคมีป้องกันกำจัดเชื้อรา (Fungicide)
- 4) สารเคมีกำจัดสัตว์ฟันแทะ (Rodenticides)

โดยสารกำจัดแมลง (Insecticide) สามารถแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มหลักตามโครงสร้างทางเคมี ได้แก่

- 1) ออร์กาโนฟอสเฟต (Organophosphates) สารเคมีในกลุ่มนี้มีองค์ประกอบของฟอสฟอรัส
- 2) ออร์กาโนคลอรีน (Organochlorines) สารเคมีในกลุ่มนี้มีโครงสร้างประกอบด้วยคลอรีน
- 3) คาร์บาเมท (Carbamate) สารเคมีในกลุ่มนี้มีโครงสร้างคาร์บาเมท
- 4) ไพรีทรอยด์ (Pyrethroids) สารเคมีในกลุ่มนี้สังเคราะห์จากไพรีทริน

ในปัจจุบันมีการนำเข้าสู่สารกำจัดวัชพืช สารกำจัดแมลง สารป้องกัน และกำจัดโรคพืชทางการเกษตรชนิดอื่น ๆ เป็นปริมาณมาก ซึ่งบ่งชี้ว่าเกษตรกรมีการนิยมใช้สารเคมีกำจัดศัตรูพืชกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากการใช้สารเคมีกำจัดศัตรูพืชมีต้นทุนที่ต่ำกว่าการใช้แรงงานคนในการกำจัดศัตรูพืช อย่างไรก็ตามการที่จะใช้งานสารเคมีกำจัดศัตรูพืชจำเป็นต้องมีความรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติเบื้องต้นของสารเคมีกำจัดศัตรูพืช เนื่องจากสารเคมีกำจัดศัตรูพืชมีอันตรายต่อตัวผู้ใช้งานรวมถึงสัตว์และสิ่งแวดล้อมได้ (อนุสรณ์, 2562) จากข้อมูลสถิติการนำเข้าวัตถุอันตรายทางการเกษตร พบว่าสารกำจัดวัชพืช สารกำจัดแมลง สารป้องกัน สารกำจัดโรคพืช และสารปราบศัตรูพืชชนิดอื่น ๆ ที่มีการนำเข้าตามข้อมูลของสำนักควบคุมพืชและวัสดุการเกษตร กรมวิชาการเกษตร ซึ่งได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 2.1 ในปัจจุบันประเทศไทยมีการเปลี่ยนแปลงไปจากภาคเกษตรไปเป็นภาคกึ่งอุตสาหกรรมทำให้แรงงานในภาคการเกษตรขาดแคลน การควบคุมและกำจัดศัตรูพืชจึงมีความสำคัญ เนื่องจากเกษตรกรยังต้องการเพิ่มผลผลิต จึงทำให้มีการใช้สารเคมีกำจัดศัตรูพืชในปริมาณที่มากขึ้น จากการใช้สารกำจัดศัตรูพืชที่มากขึ้นทำให้กรมควบคุมโรคเห็นควรว่าต้องมีสารกำจัดศัตรูพืชที่ต้องเฝ้าระวัง 12 ชนิด

ตามข้อมูลของสำนักควบคุมพืชและวัสดุการเกษตร กรมวิชาการเกษตร ปี พ.ศ. 2556 (ตารางที่ 2.2) ซึ่งเป็นสารในกลุ่มเดียวกับวัตถุอันตรายที่กรมวิชาการเกษตรเฝ้าระวัง ซึ่งสารกำจัดศัตรูพืชกลุ่มนี้เป็นสารที่อยู่ในข่ายที่ต้องเฝ้าระวังในการใช้เนื่องจากเป็นสารที่มีปริมาณการใช้มาก มีความเป็นพิษสูง หรือมีการตกค้างระยะยาวในสิ่งแวดล้อม

ตารางที่ 2.1 ปริมาณการนำเข้าวัตถุอันตรายทางการเกษตรของประเทศไทยปี 2562-2566

ปี	สารกำจัดวัชพืช	สารกำจัดแมลง	สารป้องกันและกำจัดโรคพืช	รวม
	ปริมาณ (ตัน)	มูลค่า (ล้านบาท)	ปริมาณ (ตัน)	มูลค่า (ล้านบาท)
2562	75,218.75	5,238.18	8,931.95	3,314.75
2563	42,642.81	7,859.50	12,761.51	9,941.44
2564	55,945.46	8,947.12	16,113.69	3,478.35
2565	59,257.62	9,749.81	11,369.96	2,717.47
2566	77,235.21	19,623.89	15,078.57	3,261.23

หมายเหตุ : สำนักควบคุมพืชและวัสดุการเกษตร กรมวิชาการเกษตร, 2567

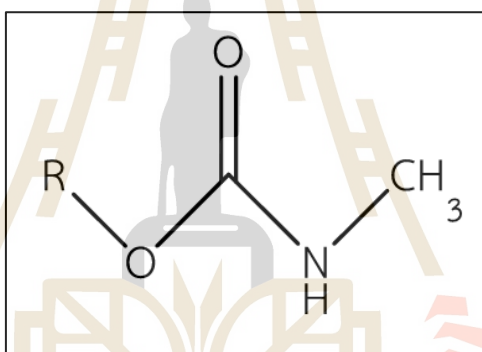
ตารางที่ 2.2 สารกำจัดศัตรูพืชและความเป็นพิษที่ต้องเฝ้าระวัง 12 ชนิด

ลำดับ	ชื่อสารเคมี	กลุ่ม	ระดับพิษ	LD ⁵⁰ (mg/kg)
1	อัลดีคาร์บ (Aldicarb)	Carbamate	la	0.93
2	บลาสติซิดิน-เอส (Blasticidin-s)	Antibiotic	lb	16
3	คาร์โบฟูราน (Carbofuran)	Carbamate	lb	8
4	ไดโครโทฟอส (Dicotophos)	Organophosphate	lb	22
5	อีพีเอ็น (EPN)	Organophosphate	la	14
6	อีโธโปรฟอส (Ethoprofos)	Organophosphate	la	33
7	โฟมีทานเนต (Formethanate)	Carbamate		21
8	เมทิดาไรออน (Methidathion)	Organophosphate	lb	25
9	เมโธมิล (Methomyl)	Carbamate	lb	17
10	อ็อกซามิล (Oxamyl)	Carbamate	lb	6
11	เอ็นโดซัลแฟน (Endosulfan)	Organochloride	li	80
12	พาราไรออนเมทิล (Parathion Methyl)	Organophosphate	la	14

หมายเหตุ : สำนักควบคุมพืชและวัสดุการเกษตร กรมวิชาการเกษตร, 2556

2.2 สารคาร์บาเมท (Carbamate)

สารกลุ่มคาร์บาเมท (Carbamate) เป็นกลุ่มสารเคมีที่ใช้ในการกำจัดแมลงและศัตรูพืช มีการนำสารคาร์บาเมทหลายชนิดมาใช้ในภาคเกษตรกรรมและการควบคุมแมลง ได้แก่ อัลดีคาร์บ (Aldicarb) คาร์โบฟูแรน (Carbofuran) ออกซามิล (Oxamyl) และเมโธมิล (Methomyl) สารเหล่านี้มักใช้ในรูปแบบของสเปรย์ (sprays) หรือเหยื่อล่อ (baits) เพื่อช่วยลดปริมาณศัตรูพืชที่ทำลายผลผลิตทางการเกษตร (Zhang et al., 2012) โดยมีสารออกฤทธิ์ที่ทำงานผ่านการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์โคลีนเอสเตอเรส (Cholinesterase) ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่สำคัญต่อระบบประสาทของแมลงและสัตว์อื่น ๆ เมื่อเอนไซม์นี้ถูกยับยั้งระบบประสาทจะทำงานผิดปกติและทำให้แมลงหรือศัตรูพืชตายไปในที่สุด (Ecobichon, D. J., 2001) โดยมีโครงสร้างพื้นฐานเป็นคาร์บาเมทอนุพันธ์ของกรดคาร์บามิก (Carbamic acid) ซึ่งเป็นกลุ่มสารเคมีกำจัดศัตรูพืชที่ใช้ในการควบคุมแมลงและศัตรูพืชอื่น ๆ สูตรโครงสร้างทั่วไปของสารเคมีกำจัดแมลงกลุ่มคาร์บาเมทแสดงดังรูปที่ 2.1 นอกจากนี้ การสัมผัสกับสารกลุ่มคาร์บาเมทจะส่งผลกระทบต่อร่างกายมนุษย์ตามตารางที่ 2.3



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างทั่วไปของสารเคมีกำจัดแมลงกลุ่มคาร์บาเมท

ตารางที่ 2.3 อาการและความรุนแรงของการเกิดพิษของสารกลุ่มคาร์บาเมท

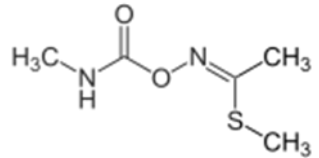
ระดับ	ระยะเวลาสัมผัส	อาการ
1.ไม่รุนแรง	4-24 ชั่วโมง	มีอาการเหนื่อย อ่อนแรง วิงเวียน และคลื่นไส้
2.รุนแรงปานกลาง	4-24 ชั่วโมง	มีอาการปวดศีรษะ เหงื่อแตก น้ำตา และน้ำลายไหล อาเจียน และสายตาพราง
3.รุนแรงมาก	>24 ชั่วโมง	เป็นตะคริวที่ท้อง ปัสสาวะราด ท้องเสีย กล้ามเนื้อสั่น ม่านตาหด ความดันโลหิตต่ำ หัวใจเต้นช้า หายใจขัด และหากไม่ได้รับการรักษาโดยทันทีจะเสียชีวิตในที่สุด

หมายเหตุ : (จาตุรงค์, 2565)

2.3 เมโธมิล (Methomyl)

เมโธมิลเป็นสารเคมีกำจัดศัตรูพืช (Pesticide) จัดอยู่ในสารกำจัดแมลง ที่อยู่ในกลุ่มคาร์บาเมท ซึ่งมีความเป็นพิษในระดับ Ib หลายประเทศมีการยกเลิกการใช้และการผลิตแล้ว เนื่องจากผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม แต่ในประเทศไทยยังเป็นสารกำจัดศัตรูพืชที่ต้องเฝ้าระวัง ข้อมูลคุณสมบัติของเมโธมิลแสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของเมโธมิล (Methomyl)

คุณสมบัติ	พารามิเตอร์	
สูตรโมเลกุล (Molecular formula)	C ₅ H ₁₀ N ₂ O ₂ S	
สูตรโครงสร้าง (Structural formula)		
น้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight)	162.2 กรัมต่อโมล	
ปริมาตรโมเลกุล (Molecular Volume)	179.9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล	
ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ที่ 24 องศาเซลเซียส	1.2946	
จุดหลอมเหลว (Melting point)	78 - 79 องศาเซลเซียส	
ลักษณะทางกายภาพ (physical state)	ลักษณะเป็นผลึกของแข็ง, สีขาว	
Log K _{ow}	0.60	
pKa	13.27	
LD ⁵⁰	17	
CAS Number	16752-77-5	
ความสามารถในการละลาย (Solubility) ในสารละลายต่างๆ (กรัมต่อกิโลกรัมของตัวทำละลายที่ 25 องศาเซลเซียส)	Water	58
	Ethanol	420
	Toluene	30
	Acetone	720
	Methanol	1000
	Isopropanol	220
ความดันไอ (vapor pressure)	0.00005 มิลลิเมตรปรอท (24 องศาเซลเซียส)	
	0.000016 มิลลิเมตรปรอท (40 องศาเซลเซียส)	

หมายเหตุ : (ภูสิต, 2558; Srikhaow et al., 2022)

2.3.1 คุณสมบัติที่มีผลต่อการเคลื่อนย้ายของเมโรมิล

คุณสมบัติที่สำคัญซึ่งส่งผลต่อการเคลื่อนย้ายของเมโรมิลในสิ่งแวดล้อมคือ ความสามารถในการละลายน้ำ โดยเมโรมิลมีค่าการละลายน้ำสูงถึง 58 กรัมต่อลิตร ซึ่งจัดว่าอยู่ในระดับที่ละลายน้ำได้ดีมาก ทำให้เมื่อมีการพ่นสารนี้ในพื้นที่เกษตรกรรม เมโรมิลจะอยู่ในเฟสน้ำเป็นหลัก และสามารถถูกชะล้างออกจากพื้นที่เพาะปลูกผ่านฝนหรือระบบชลประทานลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้อย่างง่ายดาย (Lin et al., 2020) นอกจากนี้ ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนออกทานอล-น้ำ (Octanol-water partition coefficient, K_{ow}) ของเมโรมิลอยู่ที่ 0.60 ซึ่งจัดอยู่ในระดับต่ำ แสดงให้เห็นว่าสารนี้มีแนวโน้มที่จะไม่สะสมในสิ่งมีชีวิตหรือเนื้อเยื่อที่มีไขมัน แต่จะคงอยู่ในเฟสน้ำเป็นหลัก และสามารถแพร่กระจายไปยังแหล่งน้ำต่าง ๆ ได้ (Srikhaow et al., 2022) ขณะที่ความดันไอ (Vapor Pressure) ของเมโรมิลมีค่าค่อนข้างต่ำคือ 0.00005 มิลลิเมตรปรอท ที่อุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียส และ 0.000016 มิลลิเมตรปรอท ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ซึ่งบ่งชี้ว่าสารนี้มีแนวโน้มระเหยเข้าสู่บรรยากาศได้น้อย ยกเว้นในกรณีที่เกิดละอองน้ำขณะพ่นอาจเกิดการเคลื่อนย้ายในอากาศในปริมาณเล็กน้อย (ภูสิต, 2558)

2.3.2 พฤติกรรมของเมโรมิลในดิน

เมโรมิลมีความสามารถในการเคลื่อนที่ในดินที่ค่อนข้างสูง เนื่องจากมีความสามารถในการละลายน้ำสูง เท่ากับ 58 กรัมต่อลิตรที่ 25 องศาเซลเซียส ทำให้มันสามารถเคลื่อนที่ผ่านชั้นดินได้ง่าย โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีการชลประทานหรือมีการใช้น้ำในการทำเกษตร เมื่อมีการรดน้ำหรือฝนตก สารนี้จะถูกล้างออกจากดินและอาจซึมเข้าสู่แหล่งน้ำใต้ดินหรือแหล่งน้ำผิวดินได้ นอกจากนี้จากการศึกษาของ Kroeksakul et al., 2023 ที่ดำเนินการในพื้นที่เกษตรบนที่ราบสูงของประเทศไทย พบว่ามีการปนเปื้อนของเมโรมิลในดินถึง 0.11 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมของดิน ซึ่งแม้จะอยู่ในระดับต่ำแต่ยังสามารถตรวจพบได้ เมโรมิลแสดงความสัมพันธ์ทางบวกอย่างมีนัยสำคัญกับปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดและปริมาณธาตุเหล็กในดิน ($p < 0.01$) และการเคลื่อนที่ของเมโรมิลในดินยังมีความสัมพันธ์กับเนื้อดินและลักษณะทางกายภาพของดิน เช่น ดินที่มีการระบายน้ำดีและเนื้อหยาบ อย่างดินทรายมีแนวโน้มที่จะทำให้เมโรมิลเคลื่อนที่ได้เร็ว เพราะอนุภาคดินมีพื้นที่ผิวที่ต่ำสำหรับจับยึดสารเคมีในทางกลับกันดินที่มีปริมาณอินทรีย์สูงหรือเนื้อดินละเอียดอาจจับสารเคมีไว้ได้มากกว่า นอกจากนี้การศึกษาของ Yang, G. P., et al., 2005 รายงานไว้ว่าปัจจัยภายนอก เช่น อุณหภูมิและค่าความเป็นกรดต่างของดินมีผลต่อการดูดซับของเมโรมิล โดยอุณหภูมิที่สูงและค่าความเป็นกรดต่างที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับเมโรมิลลดลง ทั้งนี้คุณสมบัติการละลายน้ำสูงของเมโรมิลยังส่งผลให้สามารถแพร่กระจายลงสู่แหล่งน้ำได้ง่าย โดยเฉพาะในดินที่มีการระบายน้ำดีและมีเนื้อหยาบ ซึ่งมีแนวโน้มทำให้เมโรมิลเคลื่อนที่และปนเปื้อนในแหล่งน้ำได้มากกว่าดินเนื้อละเอียด

2.3.3 พฤติกรรมของเมโรมิลในน้ำ

เมโรมิลในน้ำแสดงพฤติกรรมที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับสภาพค่าความเป็นกรดต่างของสภาพแวดล้อม โดยในสภาวะที่เป็นกรดและเป็นกลาง (pH 6 ถึง 7) เมโรมิลมีความเสถียรที่ค่อนข้างสูง ทำให้ค่าครึ่งชีวิตอยู่ที่ประมาณ 30 วัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในสภาพน้ำที่มีค่าความเป็นกรดต่างเหล่านี้ เมโรมิลจะสลายตัวช้าและคงอยู่ในน้ำได้เป็นระยะเวลาานาน แต่ในทางกลับกันเมื่อสภาพน้ำเปลี่ยนไปเป็นด่าง (pH มากกว่า 9) เมโรมิลจะสลายตัวได้เร็วขึ้น เนื่องจากไฮดรอกไซด์ไอออนในสภาพ

ต่างเร่งกระบวนการไฮโดรไลซิส ส่งผลให้ค่าครึ่งชีวิตลดลงเหลือเฉลี่ยประมาณ 6 วัน นอกจากนี้ปัจจัยด้านแสงแดดโดยเฉพาะแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) ยังมีบทบาทสำคัญในการเร่งกระบวนการสลายตัวด้วยแสงซึ่งเป็นปฏิกิริยาแสงที่ทำให้เมโรมิลสลายตัวได้รวดเร็วขึ้นในสภาพแวดล้อมที่มีการรับแสงเข้มข้น ปัจจัยเหล่านี้รวมกันทำให้การสลายตัวของเมโรมิลในน้ำเป็นเรื่องที่ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย โดยเฉพาะค่าความเป็นกรดต่างและความเข้มของแสงแดด (Mortensen & Serex, 2014) อย่างไรก็ตามจากการตรวจวัดในสิ่งแวดล้อม พบว่าเมโรมิลสามารถปนเปื้อนในแหล่งน้ำธรรมชาติได้ โดยตรวจพบในน้ำใต้ดินที่ระดับ 10 ไมโครกรัมต่อลิตร (Farré et al., 2002) และคลองในฟาร์มสตอร์วเบอร์รี่ที่ระดับ 30 ไมโครกรัมต่อลิตร (Cid et al., 2006) ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐานความปลอดภัยที่หน่วยงานสหภาพยุโรป (EU) กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำดื่มไว้ในคำสั่งปี 2020/2184 (ไม่เกิน 0.1 ไมโครกรัมต่อลิตร สำหรับสารกำจัดศัตรูพืชชนิดเดียวในน้ำผิวดิน) สะท้อนถึงความเสี่ยงในการปนเปื้อนของสารนี้ในระบบนิเวศน้ำ และความจำเป็นในการควบคุมการใช้และกำจัดสารนี้อย่างมีประสิทธิภาพ (Srikhaow et al., 2022)

2.3.4 ความเป็นพิษของเมโรมิล

เมโรมิลเป็นสารกำจัดแมลงในกลุ่มคาร์บาเมท โดยสารเคมีกลุ่มนี้มีไนโตรเจน (N) เป็นองค์ประกอบสำคัญ ซึ่งเมโรมิลเป็นสารที่มีความเป็นพิษสูงทั้งต่อมนุษย์และสัตว์ เนื่องจากมีฤทธิ์ในการยับยั้งเอนไซม์อะเซทิลโคลีนเอสเตอเรสซึ่งเป็นเอนไซม์ที่สำคัญในการทำลายสารสื่อประสาทอะเซทิลโคลีนทำให้เกิดการสะสมของอะเซทิลโคลีนในระบบประสาท ส่งผลให้เกิดอาการเป็นพิษ มีค่าความเป็นพิษเฉียบพลันค่า LD₅₀ ของเมโรมิลสำหรับหนูอยู่ที่ประมาณ 17 ถึง 24 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ภูสิต, 2558)

2.3.5 ค่ามาตรฐานการปนเปื้อนของเมโรมิล

ค่ามาตรฐานของเมโรมิลที่กำหนดโดย สหภาพยุโรป (EU) กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำดื่มไว้ในคำสั่งปี 2020/2184 ว่าด้วยคุณภาพน้ำที่ใช้เพื่อการบริโภคของมนุษย์ ซึ่งกำหนดค่าความเข้มข้นสูงสุดของสารกำจัดศัตรูพืชแต่ละชนิดไว้ที่ 0.1 ไมโครกรัมต่อลิตร สำหรับเมโรมิล และกำหนดค่าความเข้มข้นรวมของสารกำจัดศัตรูพืชทั้งหมดในน้ำดื่มต้องไม่เกิน 0.5 ไมโครกรัมต่อลิตร (Srikhaow, A., et al., 2022)

2.4 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับเป็นกระบวนการที่โมเลกุลของสารละลายที่ถูกจับไว้ออกจากสารละลายของเหลว โดยจะมีสารสองชนิดมาสัมผัสกัน และมีความเข้มข้นของสารเพิ่มขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัส โดยสารละลายที่มีตัวถูกดูดซับ จะสัมผัสรวมกับวัสดุที่เป็นตัวดูดซับซึ่งองค์ประกอบแต่ละชนิดในสารละลายมีความสามารถในการกระจายบนผิวและเกิดแรงดูดซับได้ต่างกัน โดยการดูดซับจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุนของตัวดูดซับ คุณสมบัติทางเคมีของตัวดูดซับและสารที่ถูกดูดซับ อุณหภูมิ ค่าความเข้มข้น ค่าความเป็นกรดต่างของสารละลาย ระยะเวลาที่สารละลายสัมผัสกับสารดูดซับ เป็นต้น

2.4.1 ประเภทของการดูดซับ

ปัจจัยสำคัญในการบ่งบอกชนิดของกระบวนการดูดซับ พิจารณาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับ โดยแรงยึดเหนี่ยวเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Forces) จะเป็นการดูดซับทางกายภาพ แต่ถ้าแรงยึดเหนี่ยวทำให้เกิดพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับจะเรียกว่า การดูดซับทางเคมี

2.4.1.1 การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption)

การดูดซับทางกายภาพเป็นกระบวนการที่สารโมเลกุลจากเฟสหนึ่งมีสถานะเป็นก๊าซหรือของเหลวเกาะติดกับพื้นผิวของของแข็ง ซึ่งเป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน คือแรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals Forces) การดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนทำให้การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อย คือ ต่ำกว่า 20 กิโลจูลต่อโมลและสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่าย การดูดซับทางกายภาพของไบโอชาร์ต่อสารกำจัดศัตรูพืช การดูดซับทางกายภาพเป็นหนึ่งในกลไกหลักที่ไบโอชาร์ใช้ในการตรึงสารกำจัดศัตรูพืชในดิน กลไกนี้อาศัยคุณสมบัติทางโครงสร้างของไบโอชาร์ เช่น พื้นที่ผิวจำเพาะ โครงสร้างรูพรุนหลายระดับ และแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่เกี่ยวข้องกับพันธะโควาเลนต์ การดูดซับประเภทนี้ช่วยลดการเคลื่อนที่ของสารกำจัดศัตรูพืชในดิน และป้องกันการชะล้างสารพิษเข้าสู่แหล่งน้ำใต้ดิน เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ กลไกการเติมเต็มรูพรุน (Pore-filling Mechanism) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ (Dong et al., 2024) แรงแวนเดอร์วาลส์เป็นแรงระหว่างโมเลกุลที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของการกระจายตัวของอิเล็กตรอนในอะตอมและโมเลกุล ซึ่งทำให้เกิดไดโพลโมเมนต์ชั่วคราว และส่งผลให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของสารกำจัดศัตรูพืชและพื้นผิวของไบโอชาร์ แรงแวนเดอร์วาลส์มักเกิดขึ้นระหว่างไบโอชาร์ที่มีโครงสร้างคาร์บอนอะโรมาติกกับสารกำจัดศัตรูพืชที่เป็นโมเลกุลไม่มีขั้ว (Non-Polar Molecules) โมเลกุลของสารกำจัดศัตรูพืชสามารถเกาะติดกับพื้นผิวของไบโอชาร์ผ่านแรงแวนเดอร์วาลส์โดยไม่ต้องมีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น เป็นแรงที่มีพลังงานต่ำเมื่อเทียบกับแรงอื่น ๆ เช่นพันธะโควาเลนต์ แต่มีความสำคัญอย่างมากต่อการดูดซับของสารอินทรีย์ที่ละลายในน้ำ (Cheng et al., 2022) กลไกการเติมเต็มรูพรุน เป็นกระบวนการที่โมเลกุลของสารกำจัดศัตรูพืชถูกดูดซับเข้าไปภายในรูพรุนของไบโอชาร์ โดยไม่ต้องอาศัยแรงทางเคมีหรือปฏิกิริยาทางไฟฟ้าสถิต ซึ่งไบโอชาร์มีโครงสร้างรูพรุนหลายระดับ ได้แก่ รูพรุนขนาดเล็ก (Micropores) มีขนาดน้อยกว่า 2 นาโนเมตร รูพรุนขนาดกลาง (Mesopores) มีขนาด 2 ถึง 50 นาโนเมตร รูพรุนขนาดใหญ่ (Macropores) มีขนาดมากกว่า 50 นาโนเมตร รูพรุนเหล่านี้ทำหน้าที่เป็น อ่างเก็บกักเก็บที่ช่วยตรึงสารกำจัดศัตรูพืชไว้ในดิน โมเลกุลของสารกำจัดศัตรูพืชสามารถถูกตรึงภายในรูพรุนได้โดยไม่สามารถเคลื่อนที่ออกจากพื้นผิวไบโอชาร์ได้ง่าย (Cheng et al., 2022)

2.4.1.2 การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption)

การดูดซับทางเคมีเป็นกระบวนการที่สารโมเลกุลจากเฟสหนึ่งมีสถานะเป็นก๊าซหรือของเหลว เกาะติดกับพื้นผิวของของแข็งโดยการสร้างพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลของสารกับพื้นผิวของวัสดุดูดซับ การดูดซับประเภทนี้มักจะมีพลังงานที่เกี่ยวข้องสูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับทางกายภาพ การดูดซับทางเคมีเกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวถูกดูดซับเดิม คือมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง

อะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิมแล้วมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ขึ้น โดยมีพันธะเคมี ซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง ซึ่งการดูดซับทางเคมีจะมีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงประมาณ 50 ถึง 400 กิโลจูลต่อโมล การดูดซับทางเคมีเป็นกลไกสำคัญที่ทำให้ไบโอชาร์สามารถตรึงสารกำจัดศัตรูพืชได้อย่างมีประสิทธิภาพ กลไกนี้เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมีระหว่างหมู่ฟังก์ชันของไบโอชาร์กับหมู่ฟังก์ชันของสารกำจัดศัตรูพืช โดยอาศัยแรงยึดเหนี่ยวที่แข็งแรงกว่าการดูดซับทางกายภาพ กลไกหลักของการดูดซับทางเคมี แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bonding) ปฏิสัมพันธ์ π - π (π - π Interactions) และแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Attraction) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

พันธะไฮโดรเจน เป็นกลไกสำคัญของการดูดซับทางเคมี ซึ่งเกิดจากการปฏิสัมพันธ์ระหว่างอะตอมไฮโดรเจนกับหมู่ฟังก์ชันที่มีอิเล็กตรอนอิสระ เช่น ออกซิเจน (O) ไนโตรเจน (N) และฟลูออรีน (F) หมู่ฟังก์ชันของไบโอชาร์ที่สามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนได้ ได้แก่ หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) หมู่คาร์บอกซิล (-COOH) หมู่แอลดีไฮด์ (-CHO) และหมู่เอมิโน (-NH₂) ในขณะที่สารกำจัดศัตรูพืชที่มีหมู่ฟังก์ชัน -OH -COOH -NH₂ และ -C=O จะมีแนวโน้มสูงในการสร้างพันธะไฮโดรเจนกับพื้นผิวของไบโอชาร์ ตัวอย่างเช่น อาหาราซินสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของไบโอชาร์ได้ พันธะไฮโดรเจนช่วยให้สารกำจัดศัตรูพืชถูกตรึงไว้ ส่งผลให้การเคลื่อนที่ของสารกำจัดศัตรูพืชในดินลดลง คงตัวเป็นเวลานานขึ้น และลดความเสี่ยงของการชะล้างลงสู่แหล่งน้ำได้ (Cheng et al., 2022; Mandal et al., 2016)

ปฏิสัมพันธ์ π - π เป็นกลไกสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับของไบโอชาร์ที่มีโครงสร้างอะโรมาติก โดยไบโอชาร์ที่ผลิตที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส จะมีโครงสร้างคาร์บอนอะโรมาติกที่เสถียรและมีความเป็นกราดิฟสูง ทำให้เกิด π -electron cloud ซึ่งสามารถเกิดการทับซ้อนกับโครงสร้างอะโรมาติกของสารกำจัดศัตรูพืชที่เป็นสารอินทรีย์ สารกำจัดศัตรูพืชที่สามารถเกิดปฏิสัมพันธ์ π - π ได้ เช่น ไดยูรอน (Diuron) อาหาราซิน (Atrazine) และพาราควอต (Paraquat) ซึ่งมีโครงสร้างอะโรมาติกที่สามารถเกิด π - π Stacking กับพื้นผิวไบโอชาร์ได้ ปฏิสัมพันธ์นี้ช่วยให้สารกำจัดศัตรูพืชถูกตรึงบนพื้นผิวของไบโอชาร์อย่างแน่นหนา และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับสารกำจัดศัตรูพืชประเภทอะโรมาติกได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ ยังช่วยลดการปลดปล่อยของสารกำจัดศัตรูพืชออกสู่สิ่งแวดล้อม ทำให้สามารถควบคุมปริมาณของสารเคมีในดินและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Cheng et al., 2022; Mandal et al., 2016)

แรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต เป็นกลไกที่มีบทบาทสำคัญในการดูดซับสารกำจัดศัตรูพืช โดยแรงดึงดูดนี้เกิดจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างประจุของไบโอชาร์และสารกำจัดศัตรูพืช ซึ่งมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการดูดซับของวัสดุ ไบโอชาร์ที่มีประจุลบ เนื่องจากหมู่คาร์บอกซิล (-COO⁻) หรือหมู่ฟอสเฟต (-PO₄³⁻) สามารถดูดซับสารกำจัดศัตรูพืชที่มีประจุบวกได้ดี ในทางกลับกันไบโอชาร์ที่มีประจุบวก เนื่องจากหมู่แอมโมเนียม (-NH₄⁺) สามารถดูดซับสารกำจัดศัตรูพืชที่มีประจุลบได้ ตัวอย่างของสารกำจัดศัตรูพืชที่ถูกดูดซับผ่านกลไกนี้ ได้แก่ พาราควอต (Paraquat) ซึ่งมีประจุบวกและสามารถถูกดูดซับบนไบโอชาร์ที่มีหมู่คาร์บอกซิล และไกลโฟเสต (Glyphosate) ซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีประจุลบและสามารถเกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตกับไบโอชาร์ที่ผ่านการดัดแปลง ปัจจัยที่มีผลต่อแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตของไบโอชาร์ ได้แก่ ค่าความเป็นกรดต่างของสิ่งแวดล้อม ซึ่งส่งผลต่อการ

เปลี่ยนแปลงของประจุหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวไบโอชาร์ โดยที่ค่าความเป็นกรดต่างเป็นกรด ไบโอชาร์ จะมีประจุบวกมากขึ้น ส่งผลให้สามารถดูดซับสารกำจัดศัตรูพืชที่มีประจุลบได้ดีขึ้น ในขณะที่ pH เป็นด่าง ไบโอชาร์จะมีประจุลบมากขึ้น ทำให้สามารถดูดซับสารกำจัดศัตรูพืชที่มีประจุบวกได้ดีขึ้น (Cheng et al., 2022; Mandal et al., 2016)

ตารางที่ 2.5 ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพ และทางเคมี

ลักษณะความแตกต่าง	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
1. ค่าความร้อนการดูดซับ	ต่ำ (อยู่ในช่วง 20-40 กิโลจูลต่อโมล)	สูง (มากกว่า 80 กิโลจูลต่อโมล)
2. สภาพจำเพาะของการดูดซับ	ไม่เจาะจง (สารดูดซับหนึ่ง ๆ สามารถดูดซับสารได้หลายชนิด)	มีความเจาะจง (เลือกดูดซับสารเป็นบางชนิดขึ้นกับสภาพของเคมีพื้นผิว)
3. ลักษณะการดูดซับบนพื้นผิวของสารดูดซับสาร	เป็นแบบชั้นเดียวหรือหลายชั้น และไม่มีการแตกตัวของสารถูกดูดซับ	เป็นแบบชั้นเดียวเท่านั้น และอาจเกิดการแตกตัวของสารถูกดูดซับ
4. อุณหภูมิของการดูดซับ	ดูดซับได้ดีในช่วงอุณหภูมิต่ำ	ดูดซับได้ดีในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง
5. แรงดึงดูดของการดูดซับ	ไม่มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างสารดูดซับและสารถูกดูดซับ	มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างสารดูดซับและสารถูกดูดซับ
6. สภาพผันกลับได้	การดูดซับสามารถผันกลับได้ และมีพลังงานกระตุ้นของการดูดซับต่ำ	การดูดซับเป็นแบบไม่ผันกลับ และมีพลังงานกระตุ้นของการดูดซับสูง
7. อัตราเร็วของการดูดซับ	เร็วและถูกควบคุมโดยความต้านทานการถ่ายโอนมวลภายในรูพรุนของสารดูดซับ	ช้าและถูกควบคุมโดยขั้นตอนของปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิวภายในของสารดูดซับ

หมายเหตุ: ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย (2554)

2.4.2 สมการไอโซเทิร์มของการดูดซับ (Adsorption Isotherm Equations)

สมการไอโซเทิร์มของการดูดซับใช้ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ (Adsorbent) กับความเข้มข้นของสารในสารละลาย (Solution) ที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิที่คงที่ สำหรับสมการไอโซเทิร์มที่นิยมใช้กันทั่วไปในงานดูดซับ คือสมการ

แลงเมียร์ (Langmuir Isotherm) สมการฟรอนด์ลิช (Freundlich Isotherm) สมการเทมคิน (Temkin Isotherm) และสมการฮิลล์ (Hill Isotherm)

2.4.2.1 สมการแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm)

สมการแลงเมียร์ ใช้เพื่ออธิบายการดูดซับของสารลงบนตัวดูดซับ สมการนี้มีพื้นฐานมาจากสมมติฐานว่า การดูดซับเป็นแบบโมนโอเลเยอร์ (monolayer) และเกิดขึ้นบนพื้นผิวที่มีตำแหน่งดูดซับที่เท่ากันทั้งหมด ต่อไปนี้เป็นรายละเอียดของสมการแลงเมียร์ อ้างอิงจาก LANGMUIR, I., (1918)

สมการแลงเมียร์

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

สมการแลงเมียร์ สามารถแสดงได้ในรูปแบบดังนี้

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m \times K_L} + \frac{C_e}{q_m} \quad (2)$$

ตัวแปรในสมการแลงเมียร์

- C_e คือ ความเข้มข้นของสารในสารละลายที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร) หมายถึง ความเข้มข้นของสารที่ยังคงอยู่ในสารละลายเมื่อการดูดซับถึงสภาวะสมดุล
- q_e คือ ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม) ที่สมดุล หมายถึง จำนวนมวลของสารที่ถูกดูดซับต่อหน่วยมวลของตัวดูดซับเมื่อถึงสภาวะสมดุล
- q_m คือ ความจุสูงสุดของการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม) หมายถึง จำนวนมวลสูงสุดของสารที่สามารถถูกดูดซับได้ต่อหน่วยมวลของตัวดูดซับเมื่อทุกตำแหน่งบนพื้นผิวถูกยึดครองทั้งหมด เป็นค่าคงที่ที่ใช้บ่งบอกความสามารถสูงสุดในการดูดซับของตัวดูดซับ
- K_L คือ ค่าคงที่แลงเมียร์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

2.4.2.2 สมการฟรอนด์ลิช (Freundlich Isotherm)

สมการฟรอนด์ลิช ใช้เพื่ออธิบายการดูดซับของสารบนพื้นผิวของตัวดูดซับ โดยสมการฟรอนด์ลิชมีสมมติฐานที่แตกต่างจากสมการแลงเมียร์ ตรงที่ไม่จำกัดการดูดซับเป็นแบบโมนโอเลเยอร์ (monolayer) และยอมรับว่าพื้นผิวของตัวดูดซับมีความหลากหลายของตำแหน่งดูดซับ อ้างอิงจาก Freundlich, H. M. F., (1906)

สมการฟรอนด์ลิช

$$q_e = K_f C_e^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

สมการฟรอนด์ลิช สามารถแสดงได้ในรูปแบบดังนี้

$$\log q_e = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e \quad (4)$$

ตัวแปรในสมการฟรอนด์ลิช

- q_e คือ ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม) ที่สมดุล
- C_e คือ ความเข้มข้นของสารในสารละลายที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)
- K_f คือ ค่าคงที่ฟรอนด์ลิช $\frac{mg}{g} \cdot \left(\frac{L}{g}\right)^{\frac{1}{n}}$ เป็นตัวบ่งบอกความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ

$\frac{1}{n}$ คือ ค่าคงที่ที่บ่งบอกถึงความเข้มข้นของการดูดซับ ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกความไม่เป็นเส้นตรงของการดูดซับ (ถ้า $n = 1$ แสดงว่าการดูดซับเป็นเส้นตรง)

2.4.2.3 สมการเทมคิน (Temkin Isotherm)

สมการเทมคิน (Temkin Isotherm) ใช้เพื่ออธิบายพฤติกรรมของการดูดซับที่ได้รับอิทธิพลจากพลังงานการดูดซับ และ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับและพื้นผิวของวัสดุดูดซับ โดยแตกต่างจาก Langmuir และ Freundlich ตรงที่สมมติฐานของแบบจำลองนี้ระบุว่า พลังงานการดูดซับจะลดลงเมื่อพื้นที่ดูดซับถูกเติมเต็ม โดยไอโซเทอมการดูดซับของเทมคินสามารถนำไปใช้ได้กับการดูดซับทางเคมีเนื่องจากในสมการจะพิจารณาถึงพลังงานการกระตุ้นของตัวดูดซับ อ้างอิงจาก Temkin & Pyzhev., (1940)

สมการเทมคิน

$$q_e = \frac{RT}{b} \ln (K_T C_e) \quad (5)$$

สมการเทมคิน สามารถแสดงได้ในรูปแบบดังนี้

$$q_e = B \ln C_e + B \ln K_T \quad (6)$$

ตัวแปรในสมการเทมคิน

- R คือ ค่าคงที่แก๊ส (8.314 จูลต่อโมลต่อเคลวิน)
- T คือ อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน
- b คือ ค่าพลังงานที่เกี่ยวข้องกับความร้อนของการดูดซับ (จูลต่อโมล)
- K_T คือ ค่าคงที่เทมคิน (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

2.4.2.4 สมการฮิลล์ (Hill Isotherm)

สมการฮิลล์ เป็นสมการที่อธิบายการดูดซับที่มีผลกระทบจากการจับตัวเป็นกลุ่ม (Cooperative Adsorption) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลที่ถูกดูดซับส่งผลต่อความน่าจะเป็นของโมเลกุลอื่นในการถูกดูดซับเพิ่มเติม โมเดลนี้มีการใช้งานอย่างกว้างขวางในระบบชีวเคมี เช่น การจับกันของโปรตีนกับลิแกนด์ และสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการดูดซับที่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ หรือสารที่มีผลต่อกันบนพื้นผิวตัวดูดซับ อ้างอิงโดย Hill, A. V., (1910)

สมการฮิลล์

$$q_e = \frac{Q_m C_e^n}{K_H + C_e^n} \quad (7)$$

สมการฮิลล์สามารถแสดงได้ในรูปแบบดังนี้

$$\log\left(\frac{q_e}{Q_m - q_e}\right) = n \log C_e - \log K_H \quad (8)$$

ตัวแปรในสมการฮิลล์

- q_e คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
- C_e คือ ความเข้มข้นของสารที่สมดุลในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
- Q_m คือ ความสามารถในการดูดซับสูงสุด (มิลลิกรัมต่อกรัม)
- K_H คือ ค่าคงที่ของฮิลล์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม) ซึ่งเกี่ยวข้องกับพลังงานการดูดซับ
- n คือ สัมประสิทธิ์ของฮิลล์ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกถึงลักษณะของการทำงานร่วมกับของโมเลกุลที่ถูกดูดซับ

2.4.3 จลนพลศาสตร์การดูดซับ (Adsorption Kinetics)

จลนพลศาสตร์การดูดซับ เป็นการศึกษาอัตราและกลไกที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการดูดซับของสารละลายหรือสารแขวนลอยลงบนพื้นผิวของตัวดูดซับ โดยเน้นถึงเวลาที่ใช้ในการดูดซับ รวมถึงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณการดูดซับเมื่อเวลาผ่านไป ในงานวิจัยด้านการดูดซับมักจะใช้แบบจำลองจลนพลศาสตร์เพื่ออธิบายอัตราการดูดซับ โดยแบบจำลองที่ใช้ เช่น แบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-First Order Kinetics) แบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม (Pseudo-Second Order Kinetics)

2.4.3.1 แบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-First Order Kinetics)

เป็นแบบจำลองที่ใช้อธิบายกระบวนการดูดซับที่อัตราการดูดซับขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายเพียงตัวเดียว หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของการดูดซับเป็นสัดส่วนกับปริมาณของสารที่ถูกดูดซับไว้ในสถานะสมดุล อ้างอิงโดย Lagergren, S., (1898) สมการจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียมสามารถแสดงได้ดังนี้:

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad (9)$$

ตัวแปรในสมการจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม

- q_e คือ ปริมาณการดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
- q_t คือ ปริมาณการดูดซับ ณ เวลาที่ t (มิลลิกรัมต่อกรัม)
- k_1 คือ ค่าคงที่ของจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง (min^{-1})
- t คือ เวลา (นาที)

ในงานวิจัยที่เกี่ยวกับการดูดซับ เช่น การบำบัดน้ำเสีย การกำจัดโลหะหนัก และการดูดซับสารอินทรีย์ แบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียมถูกใช้บ่อยในกรณีที่มีการดูดซับเกิดขึ้นโดยกระบวนการทางกายภาพ ซึ่งแรงที่เกี่ยวข้องไม่รุนแรง เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ หรือการยึดเหนี่ยวทางโมเลกุล การทำนายพฤติกรรมของการดูดซับโดยใช้สมการนี้เป็นวิธีที่ง่ายและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างกว้างขวาง อย่างไรก็ตาม การใช้แบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียมมักจะมี ความแม่นยำต่ำกว่าจลนพลศาสตร์อันดับสองในบางกรณีโดยเฉพาะในระบบที่เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวดูดซับและสารที่ถูกดูดซับ

จากการศึกษา Lagergren, S. (1898) พบว่างานวิจัยนี้นำเสนอสมการแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียมเพื่อใช้ในการอธิบายการดูดซับของสารละลายในตัวดูดซับ การศึกษานี้เป็นการพัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายการดูดซับในระบบกายภาพ โดยอ้างอิงจากการเปลี่ยนแปลงของสารที่ถูกดูดซับในช่วงเวลาหนึ่ง

2.4.3.2 แบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม (Pseudo-Second Order Kinetics)

เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการอธิบายกระบวนการดูดซับที่เกิดจากการยึดเหนี่ยวทางเคมี ระหว่างตัวดูดซับและสารที่ถูกดูดซับ โดยสมมติว่าอัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนกับจำนวนตำแหน่งว่างที่ยังไม่ได้ถูกครอบครองแบบยกกำลังสอง อ้างอิงโดย Ho, Y. S., & McKay, G. (1999)

สมการจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียมแสดงได้ดังนี้:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (10)$$

ตัวแปรในสมการจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม

- q_e คือ ปริมาณการดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 q_t คือ ปริมาณการดูดซับ ณ เวลาที่ t (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 k_2 คือ ค่าคงที่ของจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม (มิลลิกรัมต่อกรัมต่อนาที)
 t คือ เวลา (นาที)

แบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ โดยเฉพาะในกรณีที่มีการดูดซับเกิดจากการยึดเหนี่ยวทางเคมี เช่น การกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียหรือการดูดซับสารอินทรีย์ที่มีปฏิสัมพันธ์ทางเคมีกับตัวดูดซับ การทำนายพฤติกรรมของการดูดซับด้วยแบบจำลองนี้มีความแม่นยำสูงกว่าจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง โดยเฉพาะในกรณีที่มีการดูดซับเกิดขึ้นช้าและมีความสัมพันธ์กับการเกิดพันธะเคมี นอกจากนี้แบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียมยังใช้ในการศึกษาขั้นตอนการแพร่ของสารเข้าสู่ภายในอนุภาคของตัวดูดซับด้วย

จากการศึกษา Ho, Y. S., & McKay, G. (1999) พบว่างานวิจัยนี้นำเสนอสมการแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม และแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนี้สามารถอธิบายกระบวนการดูดซับหลายระบบ โดยเฉพาะในกรณีที่มีการดูดซับเกิดจากปฏิสัมพันธ์ทางเคมี ตัวอย่างเช่น การดูดซับของโลหะหนักและสารอินทรีย์บนตัวดูดซับธรรมชาติหรือถ่านกัมมันต์ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนี้สามารถทำนายการดูดซับในช่วงเวลาต่าง ๆ ได้อย่างแม่นยำ

2.5 ไบโอชาร์ (Biochar)

ไบโอชาร์ คือวัสดุที่อุดมด้วยคาร์บอน ซึ่งผลิตจากชีวมวลหรือวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร เช่น ใบไม้ เปลือกทุเรียน ฟางข้าว ชังข้าวโพด และเห้งน้ำมันสำหรับปาล์ม เป็นต้น โดยเป็นการนำชีวมวลมาผ่านกระบวนการเผาไหม้ที่มีการควบคุมอุณหภูมิและอากาศหรือจำกัดอากาศให้เข้าไปเผาไหม้น้อยที่สุด ซึ่งกระบวนการเผาไหม้เรียกว่า กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) เมื่อผ่านกระบวนการนี้จะทำให้เกิดเป็นคาร์บอนที่มีโครงสร้างอะโรมาติก มีรูพรุน และมีหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว ซึ่งไบโอชาร์มีคุณสมบัติพิเศษในการช่วยปรับปรุงคุณภาพดิน เพิ่มความสามารถในการเก็บน้ำและสารอาหารในดิน ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และมีความสามารถในการใช้เป็นวัสดุดูดซับสารพิษจากสิ่งแวดล้อม (Lehmann, J., & Joseph, S., 2009)

2.5.1 คุณสมบัติของไบโอชาร์

ไบโอชาร์จะมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ โดยน้ำหนักสูงกว่าธาตุชนิดอื่น เนื่องจากไม่ได้สัมผัสกับออกซิเจนในกระบวนการสังเคราะห์ โดยไบโอชาร์ประกอบไปด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และซิลเฟอร์ แต่ละองค์ประกอบจะเปลี่ยนไปตามชนิดของชีวมวลที่นำมาสังเคราะห์และปัจจัยในกระบวนการสังเคราะห์ เช่น อุณหภูมิ และระยะเวลา ดังนั้นเมื่อนำไบโอชาร์

มาในการปรับปรุงดิน ไบโอชาร์จะสามารถดูดซับธาตุอาหารที่มีประจุบวกได้ดีเนื่องจากตัวไบโอชาร์เป็นประจุลบ ส่งผลให้พืชเติบโตได้ดีเนื่องจากดินมีความอุดมสมบูรณ์มากขึ้น (พินิจภณ, 2557)

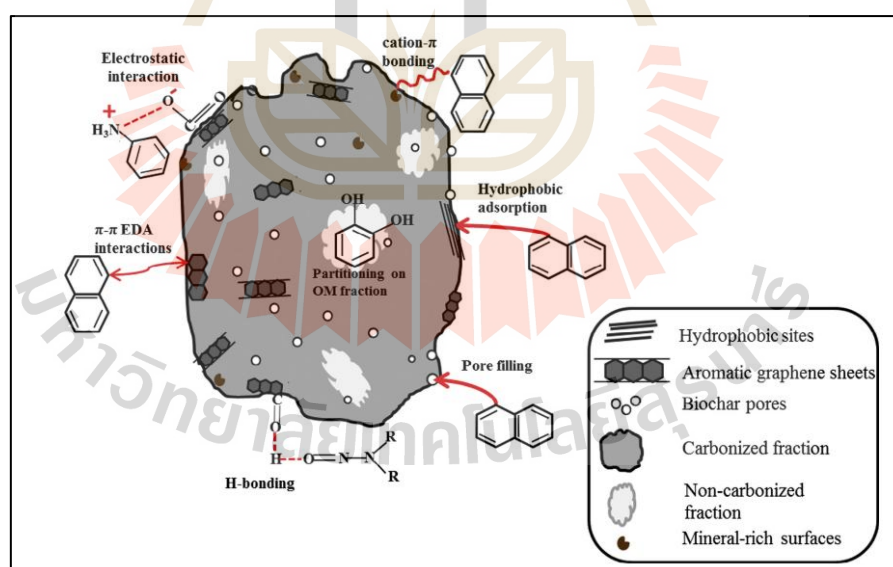
ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติของไบโอชาร์

ไบโอชาร์	คุณสมบัติ
องค์ประกอบของธาตุ	คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์
ความคงตัว	สลายตัวช้ามีอายุการใช้งานยาว
พื้นที่ผิวและรูพรุน	ช่วยดูดซับธาตุอาหารไว้บนพื้นผิวทั้งภายนอกและภายในรูพรุนได้

หมายเหตุ : (พินิจภณ, 2557)

2.5.2 กลไกการดูดซับสารปนเปื้อนของไบโอชาร์

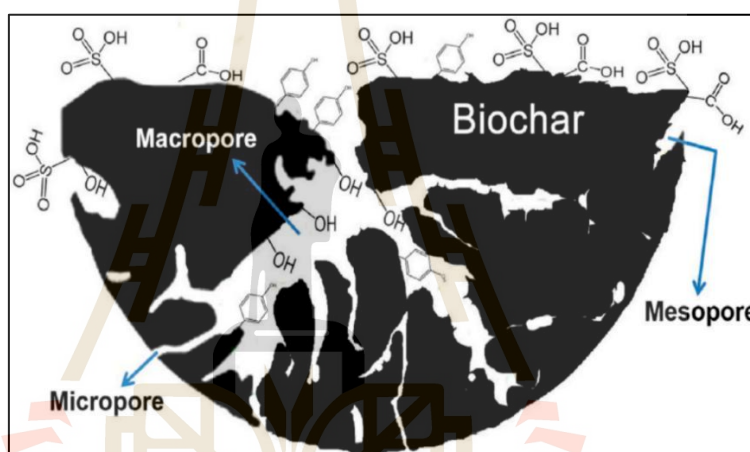
คุณสมบัติในการดูดซับสารปนเปื้อนของไบโอชาร์ ได้แก่ การเติมรูพรุน (Pore Filling) การแบ่งส่วน (Partitioning) ความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobicity) ปฏิกริยาทางอะโรมาติก และปฏิกริยาระหว่างแคตไอออนกับ π (Aromatic- and cation- π interactions) ปฏิกริยาระหว่างไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Interactions) และพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bonding) (Inyang, M., & Dickenson, E., 2015)



รูปที่ 2.2 ลักษณะกลไกการดูดซับสารปนเปื้อนของไบโอชาร์ (Inyang & Dickenson, 2015)

2.5.2.1 การเติมรูพรุน

การเติมรูพรุน หมายถึง การดูดซับของไบโอชาร์ที่เกี่ยวข้องกับการเติมเต็มรูพรุนของไบโอชาร์ โดยไบโอชาร์จะมีโครงสร้างรูพรุนที่ซับซ้อนและมีพื้นที่ผิว โดยรูพรุนของไบโอชาร์จะประกอบไปด้วยรูพรุน 3 ขนาด ได้แก่ รูพรุนขนาดเล็กมีขนาดน้อยกว่า 2 นาโนเมตร รูพรุนขนาดกลางมีขนาดอยู่ในช่วง 2 ถึง 50 นาโนเมตร รูพรุนขนาดใหญ่ มีขนาดมากกว่า 50 นาโนเมตร (Cheng & Li., 2018) ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับสารปนเปื้อนเมื่อสารปนเปื้อนในน้ำผ่านเข้าไปในรูพรุนของไบโอชาร์ พื้นที่ผิวภายในรูพรุนจะทำให้สารปนเปื้อนถูกดูดซับติดอยู่ในรูพรุน โดยเฉพาะสารโมเลกุลขนาดเล็กที่สามารถเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุนได้ง่าย กลไกนี้จะช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับสารเคมีและสารอินทรีย์ต่าง ๆ ในการบำบัดน้ำ เช่น สารกำจัดศัตรูพืช สีย้อม และสารเคมีอื่น ๆ เป็นต้น (Inyang & Dickenson, 2015)



รูปที่ 2.3 ชนิดของรูพรุนไบโอชาร์ (Cheng & Li., 2018)

2.5.2.2 การแพร่กระจาย และการแบ่งส่วน

การแพร่กระจายและการแบ่งส่วน หมายถึง กระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนโดย การแพร่กระจาย (Diffusion) เป็นกระบวนการเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำผ่านพื้นที่ผิวและภายในรูพรุนของไบโอชาร์ ความสามารถในการแพร่กระจายขึ้นอยู่กับขนาดรูพรุนและความสามารถของไบโอชาร์ในการดูดซับสารปนเปื้อนเหล่านั้น เมื่อสารปนเปื้อนเข้าสู่รูพรุนของไบโอชาร์ มันจะถูกดักจับและกักเก็บไว้ในโครงสร้างของไบโอชาร์นี้ และการแบ่งส่วน (Partitioning) เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อสารปนเปื้อนมีการกระจายตัวระหว่างเฟสของไบโอชาร์ และน้ำ การแบ่งส่วนนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของไบโอชาร์และสารปนเปื้อน ไบโอชาร์ที่มีโครงสร้างรูพรุนที่ซับซ้อนสามารถดูดซับสารปนเปื้อนที่มีความเข้ากันได้ดี ทำให้การแบ่งส่วนของสารปนเปื้อนเข้าสู่ไบโอชาร์มีประสิทธิภาพมากขึ้น (Inyang & Dickenson, 2015)

2.5.2.3 ความไม่ชอบน้ำ

ความไม่ชอบน้ำ หมายถึง การปฏิสัมพันธ์แบบไฮโดรโฟบิกเป็นการที่ไบโอซาร์ดูดซับสารปนเปื้อนที่ไม่ละลายในน้ำหรือมีความชอบน้ำต่ำ เช่น สารอินทรีย์ต่าง ๆ โดยโครงสร้างคาร์บอนในไบโอซาร์ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นไฮโดรโฟบิกจะดึงดูด และกักเก็บสารเหล่านี้เอาไว้บนพื้นผิวหรือในรูพรุนของไบโอซาร์ กระบวนการนี้มีบทบาทสำคัญในการกำจัดสารมลพิษอินทรีย์ที่ละลายในน้ำได้ยาก เช่น การดูดซับของสารเพอร์ฟลูออโรออกเทนซัลโฟเนต (Perfluorooctane Sulfonate) ถูกดูดซับโดยปฏิกิริยาที่ไม่ชอบน้ำระหว่างสาย C-F และที่ไม่ชอบน้ำบนไบโอซาร์จากฟางข้าวโพด และไบโอซาร์จากต้นวิลโลว์ (Chen, Xi, et al., 2011)

2.5.2.4 ปฏิสัมพันธ์ทางอะโรมาติกและปฏิกิริยาระหว่างแคตไอออนกับ π (Aromatic and Cation- π Interactions)

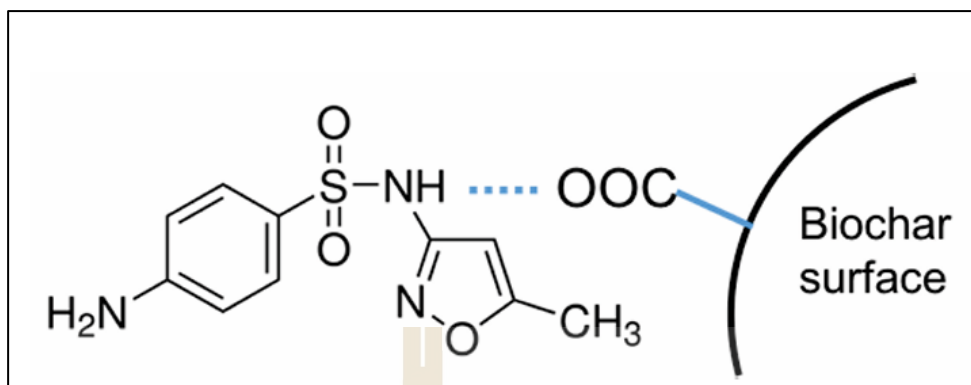
ปฏิสัมพันธ์ทางอะโรมาติกและปฏิกิริยาระหว่างแคตไอออนกับ π หมายถึง การให้และการรับอิเล็กตรอนที่ไม่ใช่พันธะโคเวเลนต์ แต่เป็นการมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างอะโรมาติกของสารปนเปื้อนกับโครงสร้างคาร์บอนของไบโอซาร์ สารปนเปื้อนที่มีวงแหวนอะโรมาติกจะถูกดึงดูดและกักเก็บไว้บนพื้นผิวของไบโอซาร์ ส่วนปฏิกิริยาระหว่างแคตไอออนเป็นปฏิสัมพันธ์ระหว่างไอออนบวกกับวงแหวนอะโรมาติกของไบโอซาร์ เช่น การมีปฏิสัมพันธ์ในการดูดซับของอะทราซีนกับไบโอซาร์ มีสาเหตุมาจากปฏิกิริยาระหว่าง π - π ระหว่างสารองค์ประกอบของคลอรีนที่ดึงอิเล็กตรอนในอะทราซีนและอะโรมาติกคาร์บอนบนพื้นผิวของถ่านไบโอซาร์

2.5.2.5 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างไฟฟ้าสถิต

ปฏิสัมพันธ์ระหว่างไฟฟ้าสถิตหมายถึง แรงดึงดูดระหว่างประจุบวกและประจุลบในสารปนเปื้อนและพื้นผิวของไบโอซาร์เป็นกลไกหลักในการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ที่เป็นไอออนิกและไอออนไนซ์ได้ ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อปฏิกิริยานี้ คือค่าความเป็นกรดและความเข้มข้นของไอออนในสารละลาย เมื่อ pH น้อยกว่า pH_{PZC} ประจุบนพื้นผิวไบโอซาร์จะมีประจุเป็นบวก และสามารถดึงดูดสารที่มีประจุลบได้ แต่เมื่อ pH มากกว่า pH_{PZC} ประจุบนพื้นผิวไบโอซาร์จะมีประจุลบ และสามารถดึงดูดสารที่มีประจุบวกได้ ปฏิสัมพันธ์นี้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับสารอินทรีย์และสารเคมีต่าง ๆ จากน้ำโดยปฏิสัมพันธ์นี้มีความแข็งแรงมากกว่าปฏิกิริยาแบบพันธะไฮโดรเจน ทำให้ไบโอซาร์สามารถกักเก็บสารมลพิษได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นในกระบวนการบำบัดน้ำ (Mukherjee et al., 2011)

2.5.2.6 พันธะไฮโดรเจน

พันธะไฮโดรเจน หมายถึง การดูดซับสารประกอบอินทรีย์เชิงขั้วบนไบโอซาร์เป็นปฏิสัมพันธ์ทางเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมไฮโดรเจนที่ผูกกับอะตอมที่มีอิเล็กตรอนมาก เช่น ออกซิเจน (O) ไนโตรเจน (N) หรือฟลูออรีน (F) กับอะตอมที่มีอิเล็กตรอนมากอื่น ๆ ที่อยู่ใกล้เคียง ไบโอซาร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนจะสามารถจับกับสารปนเปื้อนที่มีหมู่ฟังก์ชันที่เข้ากันได้ เช่น $-COOH$ $-OH$ $-NH_2$ เป็นต้น จากรูปที่ 2.3 แสดงถึงกลไกการดูดซับโดยพันธะไฮโดรเจนของสารซัลฟาเมโทซาล (sulfamethoxazole) และหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล ($-COOH$) บนพื้นผิวของไบโอซาร์



รูปที่ 2.3 กลไกการดูดซับโดยพันธะไฮโดรเจน (Tong et al., 2019)

2.5.3 การใช้ไบโอชาร์ในด้านสิ่งแวดล้อม

ไบโอชาร์เป็นวัสดุที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสของชีวมวลภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนต่ำ ซึ่งไบโอชาร์ได้รับความสนใจในงานด้านสิ่งแวดล้อม เนื่องจากมีคุณสมบัติที่เป็นประโยชน์ เช่น พื้นที่ผิวสูง โครงสร้างรูพรุน ความสามารถในการดูดซับมลพิษ และมีความเสถียรภาพในสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ยังเป็นวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและสามารถช่วยลดปัญหามลพิษทางดิน น้ำ และอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Zhang et al., 2018)

2.5.3.1 การใช้ไบโอชาร์เป็นวัสดุในการดูดซับมลพิษในดิน

ไบโอชาร์มีบทบาทสำคัญในการปรับปรุงคุณภาพดินในหลายด้าน เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติในการดูดซับสารมลพิษ กักเก็บธาตุอาหาร และปรับปรุงโครงสร้างทางกายภาพของดิน การเติมไบโอชาร์ลงในดินสามารถช่วยลดการปนเปื้อนของโลหะหนักและสารเคมีอันตรายได้ โดยการตรึงและลดความเป็นพิษของสารเหล่านี้ นอกจากนี้ Khorram et al., 2016 ศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพของไบโอชาร์ในการดูดซับสารกำจัดศัตรูพืช ระบุว่า การเติมไบโอชาร์ลงในดินช่วยลดความสามารถของพืชในการดูดซับสารกำจัดศัตรูพืช เนื่องจากโมเลกุลของสารกำจัดศัตรูพืชที่ถูกดูดซับโดยไบโอชาร์จะไม่สามารถเข้าสู่สารละลายในดินได้ ทำให้สารกำจัดศัตรูพืชเหล่านี้มีความเป็นพิษต่อพืชและสิ่งมีชีวิตในดินลดลง และในปีถัดมา Gámiz et al., 2017 มีการศึกษาประสิทธิภาพของไบโอชาร์ที่สังเคราะห์จาก ฮิคคอร์รี่มือคเกอร์นัท (*Carya tomentosa*) และพีแคน (*Carya illinoensis*) ในการดูดซับสารกำจัดศัตรูพืช โคลมาโซน (Clomazone) และ บิสไพริแบค-โซเดียม (Bispyribac Sodium) ในดิน โดยผลการศึกษพบว่าไบโอชาร์ที่ผลิตที่ 700 องศาเซลเซียส มีการดูดซับสารกำจัดศัตรูพืชสูงสุดและส่งผลให้บิสไพริแบค-โซเดียมคงอยู่ในดินนานขึ้นถึง 3 เท่า เมื่อเทียบกับดินที่ไม่มีไบโอชาร์ ซึ่งหมายความว่าไบโอชาร์สามารถนำไปใช้เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารเคมีในแหล่งน้ำใต้ดิน และลดผลกระทบต่อระบบนิเวศได้ ในทางปฏิบัติไบโอชาร์อาจถูกนำมาใช้ร่วมกับมาตรการทางการเกษตร เช่น การเติมลงในดินของพื้นที่เพาะปลูกเพื่อป้องกันการสะสมของสารกำจัดศัตรูพืชในดินและแหล่งน้ำ

2.5.3.2 การใช้ไบโอชาร์เป็นวัสดุในการดูดซับมลพิษในน้ำ

ไบโอชาร์ได้รับความสนใจสำหรับวัสดุดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารปนเปื้อนในน้ำ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสูง โครงสร้างรูพรุน และหมู่ฟังก์ชันทางเคมีที่สามารถจับกับมลพิษได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการบำบัดน้ำเสียจากภาคอุตสาหกรรม และภาคเกษตรกรรม ไบโอชาร์สามารถใช้ในการกำจัดสารปนเปื้อนหลายประเภท เช่น สารกำจัดศัตรูพืช สารอินทรีย์ตกค้าง สารมลพิษที่มีความคงตัวสูง และโลหะหนัก ซึ่งเป็นสารมลพิษที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์ ในบรรดาสารมลพิษเหล่านี้ สารกำจัดศัตรูพืชและสารเคมีจากภาคอุตสาหกรรมถือเป็นกลุ่มที่ไบโอชาร์สามารถดูดซับได้อย่างมีประสิทธิภาพ สารเหล่านี้มักปนเปื้อนในน้ำจากการใช้งานทางเกษตรกรรม และสามารถสะสมในแหล่งน้ำได้นาน ไบโอชาร์สามารถตรึงสารเหล่านี้ได้ผ่านกระบวนการดูดซับทั้งทางกายภาพและทางเคมี โดยมีกลไกหลัก ได้แก่ π - π Interactions พันธะไฮโดรเจน และแรงระหว่างประจุไฟฟ้าสถิต ซึ่งช่วยลดความเป็นพิษและการแพร่กระจายของสารในแหล่งน้ำ นอกจากนี้ ไบโอชาร์ยังสามารถลดการปนเปื้อนของสารเหล่านี้ในน้ำและช่วยป้องกันการดูดซึมเข้าสู่สิ่งมีชีวิตในระบบนิเวศทางน้ำ ซึ่งงานวิจัยของ Cosgrove Et Al., 2019 ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของสารกำจัดศัตรูพืชต่อคุณภาพของแหล่งน้ำดื่ม โดยเน้นประเด็นไปที่ผลกระทบของสารกำจัดศัตรูพืชที่มีขั้วและสามารถแพร่กระจายได้ง่าย เช่น เมทิลดีไฮด์ ซึ่งพบในเมืองเวลส์ ประเทศอังกฤษ โดยการศึกษาเน้นถึงความสำคัญของการใช้วัสดุดูดซับ ไบโอชาร์ในพื้นที่เกษตรกรรม เพื่อช่วยลดการแพร่กระจายของสารกำจัดศัตรูพืชก่อนที่มันจะเข้าสู่แหล่งน้ำดื่ม และจากงานวิจัย Alsherbeny Et Al., 2022 ศึกษากระบวนการดูดซับสารกำจัดศัตรูพืช 10 ชนิด ได้แก่ อาหารซิน คลอร์เฟนิทอส คลอร์ไพริฟอส ไซโปรดิโนล ไดอะซินอน ไดเมโทเอต ไดยูรอน เอโทอน มาลาไทออน และโพรเฟโนฟอส ด้วยไบโอชาร์จากซังข้าวโพดที่ไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส โดยเน้นประเด็นไปที่สมมูลของการดูดซับ และจลนศาสตร์ของการดูดซับ โดยเฉพาะเมื่อใช้ไบโอชาร์ในน้ำที่มีสถานะที่มีค่าความเป็นกรดอ่อน และมีการใช้ปริมาณไบโอชาร์ที่เหมาะสม จะส่งผลให้กระบวนการดูดซับจะเป็นไปตามแลงเมียร์ไอโซเทิร์ม และแบบจำลองอันดับหนึ่งเทียม ซึ่งบ่งชี้ถึงศักยภาพของไบโอชาร์จากซังข้าวโพดในการดูดซับสารกำจัดศัตรูพืชจากน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้สารกำจัดศัตรูพืชที่มีค่า K_{ow} สูง หรือมีคุณสมบัติเป็นสารที่ไม่ชอบน้ำ เช่น คลอร์เฟนิทอส คลอร์ไพริฟอส ไซโปรดิโนล ไดอะซินอน ไดยูรอน เอโทอน และโพรเฟโนฟอส มีแนวโน้มถูกดูดซับได้ดีบนไบโอชาร์ ในทางตรงกันข้าม สารกำจัดศัตรูพืชที่มีขั้วสูงเช่น อาหารซิน ไดเมโทเอต และมาลาไทออน กลับมีอัตราการดูดซับต่ำกว่า และต้องใช้ระยะเวลาเพิ่มขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำสามารถแข่งขันกับโมเลกุลของสารเหล่านี้ในการจับกับหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วบนพื้นผิวของไบโอชาร์ ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง

2.6 กระบวนการสังเคราะห์ไบโอชาร์

การสังเคราะห์ไบโอชาร์เป็นกระบวนการเปลี่ยนวัสดุชีวมวลให้กลายเป็นของแข็งที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งมีคุณสมบัติเฉพาะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับสารมลพิษในน้ำและดิน ได้แก่ พื้นที่ผิวจำเพาะ โครงสร้างรูพรุน และหมู่ฟังก์ชันทางเคมีบนพื้นผิว การเลือกวัสดุตั้งต้นมีผลโดยตรงต่อคุณสมบัติของไบโอชาร์ โดยปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อคุณภาพของไบโอชาร์ ได้แก่ อุณหภูมิของกระบวนการ เวลาในการให้ความร้อน และชนิดของบรรยากาศที่ใช้ เช่น ไนโตรเจน หรือสภาวะ

ไม่ใช้ออกซิเจน หนึ่งในเทคนิคหลักที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์ไบโอชาร์คือ กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) ซึ่งเป็นกระบวนการทางเคมีที่นำชีวมวลมาผ่านความร้อนในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนน้อยหรือไม่มีเลย โดยการไพโรไลซิสจะทำให้สารอินทรีย์ในชีวมวลแตกตัวออกเป็นผลิตภัณฑ์หลักสามชนิด ได้แก่ ไบโอชาร์ (Biochar) น้ำมันชีวภาพ (Bio-Oil) และก๊าซสังเคราะห์ (Syngas) ซึ่งไบโอชาร์ส่วนใหญ่จะเป็นประกอบไปด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากผ่านกระบวนการไพโรไลซิส และการไพโรไลซิสจะแบ่งออกเป็นการไพโรไลซิสแบบช้า (Slow Pyrolysis) และไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast Pyrolysis) ซึ่งชนิดของการไพโรไลซิสจะให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากผ่านกระบวนการที่แตกต่างกันออกไป (Varjani, S., Kumar, G., & Rene, E. R., 2019).

2.6.1 ไพโรไลซิสแบบช้า (Slow pyrolysis)

ไพโรไลซิสแบบช้าเป็นกระบวนการไพโรไลซิสที่มีการทำปฏิกิริยาในอุณหภูมิระหว่าง 100 ถึง 1000 องศาเซลเซียส มีอัตราการให้ความร้อนต่ำประมาณ 5 ถึง 7 องศาเซลเซียสต่อนาที และให้ความร้อนกับชีวมวลอย่างช้า ๆ ใช้เวลาหลายชั่วโมง ตั้งแต่ 1 ถึง 24 ชั่วโมง ผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิสแบบช้ามีสัดส่วนเป็นไบโอชาร์ 30 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ น้ำมันชีวภาพ และก๊าซสังเคราะห์ ในปริมาณน้อยกว่า และมักมีการจำกัดออกซิเจนเพื่อไม่ให้เกิดการลุกไหม้แปรสภาพเป็นถ่าน สารชีวมวลจะเกิดการแตกสลายเชิงความร้อน ให้สารที่ระเหยได้ออกไปจนกระทั่งได้ผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ไม่เผาไหม้ และมีคาร์บอนคงตัวในปริมาณที่สูง ดังตารางที่ 2.7

2.6.2 ไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast pyrolysis)

ไพโรไลซิสแบบเร็ว เป็นกระบวนการไพโรไลซิสที่มีการทำปฏิกิริยาในอุณหภูมิระหว่าง 300 ถึง 10000 องศาเซลเซียส มีอัตราการให้ความร้อนสูงประมาณ 300 ถึง 800 องศาเซลเซียสต่อนาที และให้ความร้อนกับชีวมวลอย่างรวดเร็ว โดยใช้เวลาในหน่วยวินาทีถึงนาที ประมาณ 0.5 ถึง 10 วินาที ผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิสแบบเร็วมีสัดส่วนเป็นน้ำมันชีวภาพ 15 ถึง 35 เปอร์เซ็นต์ ก๊าซสังเคราะห์ และไบโอชาร์ ในปริมาณน้อยกว่า ซึ่งสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงเหลวหรือวัตถุดิบในกระบวนการผลิตเคมีภัณฑ์ นอกจากนี้ยังมีการจำกัดออกซิเจนเพื่อไม่ให้เกิดการลุกไหม้แปรสภาพเป็นถ่านอีกด้วย ดังตารางที่ 2.7

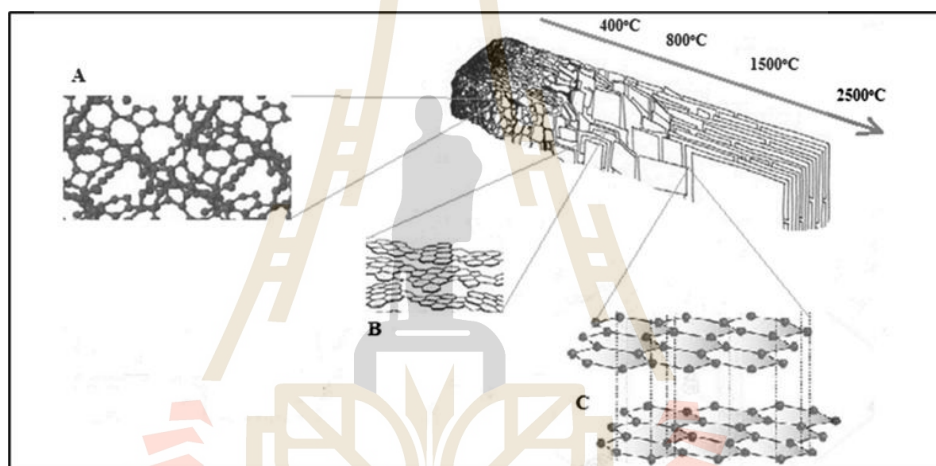
ตารางที่ 2.7 ประเภทของการไพโรไลซิส

ประเภทของลักษณะ	ประเภทของการไพโรไลซิส	
	ไพโรไลซิสแบบช้า	ไพโรไลซิสแบบเร็ว
1. อัตราการทำความร้อน(องศาเซลเซียสต่อนาที)	5-7	300-800
2. อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	100-1000	300-1000
3. ระยะเวลา	>1 ชั่วโมง	0.5-10 วินาที
4. ผลิตภัณฑ์หลัก	ไบโอชาร์	น้ำมันชีวภาพ
5. ผลผลิตถ่านไบโอชาร์ (wt %)	35-50	15-35

หมายเหตุ : (VARJANI, S., et al., 2019)

2.6.3 ผลกระทบของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อคุณสมบัติของไบโอชาร์

ผลกระทบของอุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิสตั้งแต่อุณหภูมิห้องถึง 200 องศาเซลเซียส จะส่งผลให้เกิดการระเหยของน้ำและสารระเหยต่าง ๆ ซึ่งการระเหยของน้ำจะทำให้เกิดการแตกของพันธะ และเกิดการสร้างกลุ่ม ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ $-COOH$ (คาร์บอกซิล) และ $-CO$ (คาร์บอนิล) บนพื้นผิวของไบโอชาร์ จากนั้นเมื่ออุณหภูมิ 200 จนถึง 500 องศาเซลเซียส จะเกิดการสลายตัวอย่างรวดเร็วของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลส นอกจากนี้ยังช่วยให้กลุ่มคาร์บอนเปลี่ยนแปลงเป็นโครงสร้างอะโรมาติก และเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส จะส่งผลให้เกิดการสลายตัวของลิกนินและสารอินทรีย์อื่น ๆ ส่งผลต่อโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันของไบโอชาร์ ซึ่งจะทำให้ไบโอชาร์มีลักษณะทางโครงสร้างที่มีความเสถียรสูงและมีชั้นคาร์บอนเรียงตัวเป็นระเบียบมากขึ้น แต่จะมีกลุ่มฟังก์ชันที่ลดลงเนื่องจากการสลายตัวของลิกนิน (Tomczyk et al., 2020)



รูปที่ 2.4 ผลกระทบของอุณหภูมิในการไพโรไลซิสต่อโครงสร้างของไบโอชาร์ (Tomczyk et al., 2020)

2.7 เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของไบโอชาร์ (Biochar Yield %)

เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของไบโอชาร์เป็นค่าที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการไพโรไลซิส โดยแสดงถึงสัดส่วนของไบโอชาร์ที่ได้รับหลังจากการเผาไหม้แบบไร้ออกซิเจน เมื่อเปรียบเทียบกับมวลเริ่มต้นของชีวมวลที่ใช้ สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของไบโอชาร์} = \left(\frac{\text{มวลของไบโอชาร์ที่ได้ (กรัม)}}{\text{มวลของชีวมวลเริ่มต้น}} \right) \times 100\%$$

ค่าที่ได้เป็นเปอร์เซ็นต์ของชีวมวลที่ถูกเปลี่ยนเป็นไบโอชาร์หลังจากผ่านกระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งเป็นตัวชี้วัดที่สำคัญในการออกแบบและปรับปรุงกระบวนการผลิตไบโอชาร์ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด (Sun et al., 2017)

2.8 คุณสมบัติของเหง้ามันสำปะหลัง

เหง้ามันสำปะหลังเป็นส่วนที่อยู่เหนือรากของลำต้นมันสำปะหลัง เป็นส่วนที่แข็งของต้นมันสำปะหลัง และส่วนใหญ่กลายเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร แต่เมื่อนำมาวิเคราะห์ พบว่ามีคุณสมบัติที่จะนำมาผลิตเป็นไบโอชาร์ได้ ดังแสดงในตารางที่ 2.8 ซึ่งระบุคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของเหง้ามันสำปะหลัง เช่น ความชื้น (Moisture Content) ปริมาณสารอินทรีย์ (Organic Matter) ปริมาณเถ้า (Ash Content) ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) และระบุคุณสมบัติเกี่ยวกับองค์ประกอบทางเคมีของเหง้ามันสำปะหลัง เช่น ปริมาณคาร์บอน (Carbon) ไฮโดรเจน (Hydrogen) ไนโตรเจน (Nitrogen) และออกซิเจน (Oxygen) ซึ่งปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) บ่งบอกถึงปริมาณคาร์บอนที่คงเหลือในวัสดุหลังจากที่น้ำ สารระเหย (Volatile Matter) และเถ้า (Ash) ถูกกำจัดออกไปผ่านกระบวนการไพโรไลซิส ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) แสดงถึงปริมาณคาร์บอนที่มีอยู่ในวัสดุซึ่งสามารถทำหน้าที่เป็นแหล่งพลังงานหลักในกระบวนการเผาไหม้หรือการผลิตไบโอชาร์ได้ (Shariff et al., 2016) นอกจากนี้ชีวมวลที่มีสัดส่วนของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินที่เหมาะสมจะส่งผลต่อโครงสร้างและคุณสมบัติของไบโอชาร์ โดยเฉพาะลิกนินที่สูงจะเพิ่มปริมาณคาร์บอนและความเสถียรของไบโอชาร์ (Mukherjee et al., 2022)

ตารางที่ 2.8 คุณสมบัติของเหง้ามันสำปะหลัง

Proximate analysis (% w/w, as received basis)	
Moisture	10.6
Volatile matter	70.7
Fixed carbon	13.5
Ash	5.2
Ultimate analysis (% w/w, dry basis)	
C	43.1
H	6.0
N	0.8
O	44.2

หมายเหตุ : Tippayawong, Rerkkriangkrai, Aggarangsi, & Pattiya, 2017

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.9.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ไบโอชาร์จากชีวมวล

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า พบว่าชนิดของชีวมวลที่ใช้เป็นวัตถุดิบเริ่มต้น มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อคุณสมบัติของไบโอชาร์ โดยชีวมวลแต่ละชนิดมีองค์ประกอบของลิกนิน เซลลูโลสที่แตกต่างกัน ส่งผลต่อคาร์บอนคงตัว ความพรุน และพื้นที่ผิวจำเพาะของไบโอชาร์ ตัวอย่างเช่น งานของ Wijitkosum & Jiwnok., 2019 ศึกษาการสังเคราะห์ไบโอชาร์จากเหง้ามันสำปะหลัง ต้นมันสำปะหลัง และซังข้าวโพด พบว่าได้ไบโอชาร์ที่มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูง 62.95

ถึง 81.35% และมีโครงสร้างรูพรุนที่พัฒนาเด่นชัด ส่วนงานของ Salehi et al., 2020 ที่ใช้เศษใบชา เป็นวัสดุดิบ พบว่าไบโอชาร์ที่ได้มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงสุดประมาณ 38.42 %

ในด้านของอุณหภูมิในการไพโรไลซิส ซึ่งเป็นอีกปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการสลายตัวขององค์ประกอบทางชีวภาพ เช่น เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน พบว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้เกิดการสลายตัวที่สมบูรณ์มากขึ้น ช่วยเพิ่มความเสถียรของไบโอชาร์และเพิ่มปริมาณคาร์บอนคงตัว โดย Aup-Ngoen & Noipitak., 2020 รายงานว่าการเพิ่มอุณหภูมิจาก 400 เป็น 600 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ค่าคาร์บอนคงตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่ในขณะเดียวกัน น้ำหนักของชีวมวลจะลดลงจากการสลายตัวขององค์ประกอบทางธรรมชาติ เหมือนกับ Mohamed Noor et al., 2012 ที่ศึกษาต้นมันสำปะหลัง และเหง้ามันสำปะหลัง พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิไพโรไลซิสตั้งแต่ 400 ถึง 600 องศาเซลเซียส ภายใต้อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที มีผลทำให้ค่าคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยในกรณีของต้นมันสำปะหลัง ค่าคาร์บอนคงตัวเพิ่มจาก 78.39% ที่ 400 องศาเซลเซียส เป็น 87.00% ที่ 600 องศาเซลเซียส และในกรณีของเหง้ามันสำปะหลัง ค่าคาร์บอนคงตัวเพิ่มจาก 79.20% เป็น 84.11% ตามลำดับ ขณะที่ปริมาณความชื้นและสารระเหยลดลงอย่างต่อเนื่อง แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิมิมีบทบาทสำคัญในการกำจัดองค์ประกอบที่ไม่เสถียรและเพิ่มสัดส่วนของคาร์บอนในไบโอชาร์อย่างมีประสิทธิภาพ

สำหรับระยะเวลาในการไพโรไลซิส ก็มีบทบาทสำคัญเช่นกัน โดย Wijitkosum & Jiwonok, 2019 ใช้ระยะเวลา 12 ถึง 24 ชั่วโมง และใช้เตาตัดแปลงจากถังเหล็กขนาด 200 ลิตร ภายใต้สภาวะไม่มีออกซิเจน พบว่าได้ไบโอชาร์ที่มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูง และโครงสร้างรูพรุนที่พัฒนาเด่นชัด แสดงให้เห็นถึงประโยชน์ของการให้เวลาที่เพียงพอเพื่อให้การสลายตัวขององค์ประกอบอินทรีย์สมบูรณ์ และในงานของ Aup-Ngoen & Noipitak., 2020 และ Mohamed Noor et al., 2012 ใช้ระยะเวลาเพียง 1 ถึง 2 ชั่วโมง โดยใช้เตาเผาไพโรไลซิสในระดับห้องปฏิบัติการ ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิได้แม่นยำ เตาประเภทนี้เหมาะสำหรับการผลิตในขนาดเล็ก และช่วยป้องกันการเกิดออกซิเดชันในระหว่างกระบวนการเผาไหม้ ส่งผลให้ได้ไบโอชาร์ที่มีความบริสุทธิ์สูงและคุณภาพดี อย่างไรก็ตาม การใช้ระยะเวลานานกว่ามีแนวโน้มช่วยให้เกิดการพัฒนาโครงสร้างรูพรุนและเสถียรภาพของคาร์บอนได้มากยิ่งขึ้น ดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 การสังเคราะห์ไบโอชาร์จากชีวมวล

อ้างอิง	ชนิดชีวมวล	อุณหภูมิในการไพโรไลซิส	ระยะเวลาในการไพโรไลซิส	อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ	สรุปผลการศึกษา
AUP-NGOEN, K., & Noipitak, M., 2020	เหง้ามันสำปะหลัง เปลือกทุเรียน เปลือกสับปะรด ซังข้าวโพด	400-600 องศาเซลเซียส	2 ชั่วโมง	5 องศาเซลเซียสต่อ นาทีก	ปริมาณคาร์บอนคงตัวในวัสดุชีวมวลสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น
SALEHI, E., et al., 2020	เศษใบชา	300-500 องศาเซลเซียส	-	5 องศาเซลเซียสต่อ นาทีก	เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น มีการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวจำเพาะจาก 1.9 ตารางเมตรต่อกรัม เป็น 5.6 ตารางเมตรต่อกรัม
WIJITKOSUM, S., & Jiwonok, P., 2019	เหง้ามันสำปะหลัง ต้นมันสำปะหลัง ซังข้าวโพด	500-600 องศาเซลเซียส (ควบคุมอุณหภูมิในช่วงนี้)	12-24 ชั่วโมง	-	ไบโอชาร์ที่ได้มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูง (62.95–81.35 เปอร์เซ็นต์) และโครงสร้างรูพรุนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ
MOHAMED NOOR, N., et al., 2012	ลำต้นมันสำปะหลัง เหง้ามันสำปะหลัง	400-600 องศาเซลเซียส	1 ชั่วโมง	5-25 องศาเซลเซียส ต่อนาทีก	อุณหภูมิสูงขึ้นและอัตราการให้ความร้อนที่สูงขึ้นทำให้ปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณผลผลิตไบโอชาร์ลดลง

2.9.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับสารปราบศัตรูพืชด้วยไบโอชาร์

จากการทบทวนวรรณกรรม พบว่าไบโอชาร์ที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปลงสามารถดูดซับสารกำจัดศัตรูพืชได้อย่างมีประสิทธิภาพในระดับหนึ่ง เนื่องจากประสิทธิภาพการดูดซับขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวลและเงื่อนไขในการผลิต โดย Mandal et al., 2017 ศึกษาการดูดซับอาหารสีนและอิมิดาโคลพริตด้วยไบโอชาร์จากชีวมวล 5 ชนิดภายใต้สภาวะเดียวกัน ได้แก่ เปลือกยูคาลิปตัส (EBBC) ชังข้าวโพด (CCBC) เศษไม้ไผ่ (BCBC) แกลบ (RHBC) และ ฟางข้าว (RSBC) ผลการศึกษา พบว่าไบโอชาร์จากฟางข้าว (RSBC) ให้ผลการดูดซับสูงที่สุดในกลุ่มไบโอชาร์ โดยมีค่าการดูดซับอาหารสีนอยู่ในช่วง 37.5 ถึง 70.7 เปอร์เซ็นต์ และอิมิดาโคลพริต 39.9 ถึง 77.7 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือ แกลบ, เปลือกยูคาลิปตัส, ชังข้าวโพด และ เศษไม้ไผ่ ตามลำดับ นอกจากนี้ Mayakaduwa et al., 2016 รายงานว่าไบโอชาร์จากเศษใบชาที่ผ่านการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพสูงในการดูดซับคาร์โบฟูราน โดยมีความจุการดูดซับสูงสุดที่ 22.75 มิลลิกรัมต่อกรัมที่พีเอช 5 และจากการวิเคราะห์ FTIR ก่อนดูดซับพบว่าหมู่ฟังก์ชันสำคัญ เช่น -OH, -COOH และ -C=O ปรากฏบนพื้นผิวไบโอชาร์ แต่หลังดูดซับความเข้มข้นของหมู่ -OH และ -COOH ลดลง แสดงถึงการมีปฏิสัมพันธ์กับคาร์โบฟูรานผ่านการเกิดพันธะไฮโดรเจน ซึ่งให้เห็นว่ากลไกการดูดซับของไบโอชาร์ที่ไม่ได้ดัดแปลงประกอบด้วย การเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ฟังก์ชัน -OH และ -COOH การยึดเหนี่ยวด้วยแรงไฟฟ้าสถิต และปฏิสัมพันธ์แบบ $\pi-\pi$ ระหว่างวงแหวนอะโรมาติกบนผิวไบโอชาร์และสารกำจัดศัตรูพืช ซึ่งสะท้อนว่าแม้ไม่มีการดัดแปลง แต่ไบโอชาร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันพื้นผิวที่เหมาะสมก็ยังสามารถดูดซับสารพิษจากน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในทางกลับกัน การดัดแปลงไบโอชาร์ด้วยกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มขีดความสามารถในการดูดซับ โดยเฉพาะต่อสารเคมีกำจัดศัตรูพืชที่มีขั้วสูง จากงานของ Mandal et al., 2017 พบว่าเมื่อไบโอชาร์จากฟางข้าว (RSBC) ได้รับการดัดแปลงเป็น T-RSBC การดูดซับมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น โดยมีค่าการดูดซับของอาหารสีนเพิ่มขึ้นจากเป็น 59.5 ถึง 89.8 เปอร์เซ็นต์ และอิมิดาโคลพริตเพิ่มเป็น 58.2 ถึง 89.5 เปอร์เซ็นต์ แม้ว่าพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของ T-RSBC จะลดลง แต่เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยกลับเพิ่มขึ้นจาก 19.23 เป็น 29.54 นาโนเมตร ซึ่งเอื้อต่อการเข้าถึงของสารขนาดใหญ่หรือมีขั้วสูงได้ดียิ่งขึ้น การเพิ่มหมู่ฟังก์ชัน เช่น -OH และ -COOH จากการดัดแปลงยังเสริมแรงยึดเหนี่ยวผ่านพันธะไฮโดรเจนและแรงแวนเดอร์วาลส์ นอกจากนี้ ค่า R^2 ที่สูงกว่า 0.99 บ่งชี้ว่าพฤติกรรมดูดซับสามารถอธิบายได้ดีด้วยแบบจำลองฟรันทซ์ลิช ผลการศึกษายังพบว่า อิมิดาโคลพริต ซึ่งเป็นสารที่มีประจุบวกภายใต้พีเอช 6.9 ถึง 10.1 จะมีแรงยึดเหนี่ยวที่มากกว่าเมื่อจับกับผิวไบโอชาร์ที่มีประจุลบ ส่วนอาหารสีนที่อยู่ในรูปกลาง (Neutral Species) ในช่วงพีเอชเดียวกันจะมีปฏิสัมพันธ์น้อยกว่าดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการดัดแปลงไบโอชาร์ด้วยกรดฟอสฟอริกส่งผลเชิงบวกต่อประสิทธิภาพการดูดซับทั้งในเชิงกลไกและเชิงปริมาณ ดังตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 การดูดซับสารเคมีกำจัดศัตรูพืชด้วยไบโอชาร์

อ้างอิง	ชนิดของไบโอชาร์	ชนิดสารเคมีกำจัดศัตรูพืช	เครื่องมือวิเคราะห์	ผลการศึกษา	กลไกการดูดซับ
MANDAL, A., et al., 2017	เปลือกยูคาลิปตัส (EBBC) ชั่งข้าวโพด (CCBC), เศษไม้ไผ่ (BCBC), แกลบ (RHBC), ฟางข้าว (RSBC) ฟางข้าวที่ผ่านการตัดแปลงด้วยกรดฟอสฟอริก (T-RSBC)	อะทราซีน(Atrazine) อิมิดาโคลพริด (Imidacloprid)	Highperformance liquid chromatography (HPLC).	- RSBC: อะทราซีน (37.5–70.7%) อิมิดาโคลพริด (39.9–77.8%) T-RSBC: อะทราซีน (58.9–89.8%) อิมิดาโคลพริด (58.2–89.5%)	- พันธะไฮโดรเจน (-OH, -COOH) - แรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต
TAHA, S. M., et al., 2014	ฟางข้าว (BRc) ชั่งข้าวโพด (BCn)	Azinphos-methyl, Phosmet, Boscalid, Chlorfenvinphos, Flutolanil, Diazinon, Carbaryl, Malathion, Imidacloprid, Acetamiprid, Propiconazole, Flusilazole, Triadimenol, Atrazine และ Oxamyl	Liquid Chromatography Tandem Mass Spectrometry (LC-MS/MS).	- TBRc: ลดความเข้มข้นของสารกำจัดศัตรูพืชในน้ำเหลือ $\leq 0.005 \mu\text{g/L}$ ภายใน 2 ชั่วโมง สำหรับ Oxamyl ลดเหลือ $\leq 0.068 \mu\text{g/L}$ ภายใน 24 ชั่วโมง	- พันธะไฮโดรเจน (-OH, -COOH) - แรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต แรงแวนเดอร์วาลส์
MAYAKAD UWA, S. S., et al., 2016	เศษใบชา (Tea Waste)	คาร์โบฟูราน (Carbofuran)	- UV-Vis Spectrophotometer	- ค่าการดูดซับสูงสุดอยู่ที่ 22.75 mg/g	- พันธะไฮโดรเจน (-OH, -COOH) - แรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต ปฏิสัมพันธ์แบบ π - π ระหว่างวงแหวนอะโรมาติกของไบโอชาร์และคาร์โบฟูราน
อ้างอิง	ชนิดของไบโอชาร์	ชนิดสารเคมีกำจัดศัตรูพืช	- เครื่องมือวิเคราะห์	ผลการศึกษา	- กลไกการดูดซับ

บทที่ 3

การศึกษาดำเนินงาน

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสังเคราะห์ไบโอชาร์จากเหง้ามันสำปะหลังโดยจะใช้กรดฟอสฟอริก และโซเดียมซิลิเกต ในการดัดแปลงไบโอชาร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับเมธิลีน จากนั้นจะนำไบโอชาร์ทั้งสาม ชนิดประกอบด้วย ไบโอชาร์ที่สังเคราะห์จากเหง้ามันสำปะหลังใช้ด้วยชื่อเป็น BCA ไบโอชาร์ที่สังเคราะห์จากเหง้ามันสำปะหลังที่ดัดแปลงด้วยโซเดียมซิลิเกตจะใช้ด้วยชื่อเป็น BNS และไบโอชาร์ที่สังเคราะห์จากเหง้ามันสำปะหลังที่ดัดแปลงด้วยกรดฟอสฟอริกจะใช้ด้วยชื่อเป็น BHP ไปใช้ในการดูดซับเมธิลีน ซึ่งการทดลองส่วนแรกเป็นการสังเคราะห์ไบโอชาร์จากเหง้ามันสำปะหลัง และทำการเลือกไบโอชาร์ที่ได้จากการสังเคราะห์จากการนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติด้วยเทคนิคต่าง ๆ ได้แก่ เทคนิควิเคราะห์ธาตุ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ (Carbon, Hydrogen, Nitrogen, Sulfur Analysis, CHNS) เทคนิคฟูเรียร์ทรานซฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรเมตรี (Fourier-Transform Infrared Spectroscopy, FTIR) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) เทคนิคการถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์สามมิติระดับจุลภาคด้วยเอกซเรย์ย่านพลังงานสูงจากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอน (X-ray Tomographic Microscopy, XTM) เทคนิควิเคราะห์พื้นที่และความพรุนของอนุภาค (Brunauer-Emmett-Teller, BET) เทคนิคการวิเคราะห์ค่าประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ (Point of zero charge, pH_{pzc}) ซึ่งจะเลือกตัวแทนไบโอชาร์ที่มีความเหมาะสมที่สุด จากเปอร์เซ็นต์คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และ อัตราสัดส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอน ด้วยเทคนิค CHNS ส่วนเทคนิคอื่นๆ จะนำมาใช้ในการอธิบายลักษณะด้านอื่นๆ ของไบโอชาร์ที่ได้รับเลือก จากนั้นจะเป็นการทดลองส่วนที่สองคือการดูดซับเมธิลีน ซึ่งได้แบ่งการศึกษาผลการดูดซับออกเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับดังนี้ ระยะเวลาสัมผัส ความเร็วรอบในการกวน ค่าความเป็นกรดต่าง น้ำหนักวัสดุดูดซับ ซึ่งความเข้มข้นของเมธิลีนจะได้รับการตรวจวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์สารด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟีชนิดของเหลวสมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatography, HPLC) แล้วหาแนวโน้มประสิทธิภาพการบำบัดเมธิลีนเทียบกับเวลา โดยการทดลองที่กล่าวมาจะมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

3.1 สารเคมี เครื่องมือ และอุปกรณ์

3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

สารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์ไบโอชาร์จากเหง้ามันสำปะหลังเพื่อดูดซับเมธิลีน ได้แก่ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide, NaOH) กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric Acid, HCL) กรดฟอสฟอริก (Phosphoric Acid, H_3PO_4) โซเดียมซิลิเกต (Sodium Silicate, Na_2SiO_3) เอทานอล (Ethanol) อะซิโตนไนไตรท์ (Acetonitrile) เมทานอล (Methanol)

น้ำปราศจากไอออน (Deionized water) และเมธอไมล์ (Methomyl) แต่ไม่รวมสารเคมีที่ใช้วิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอชาร์

3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

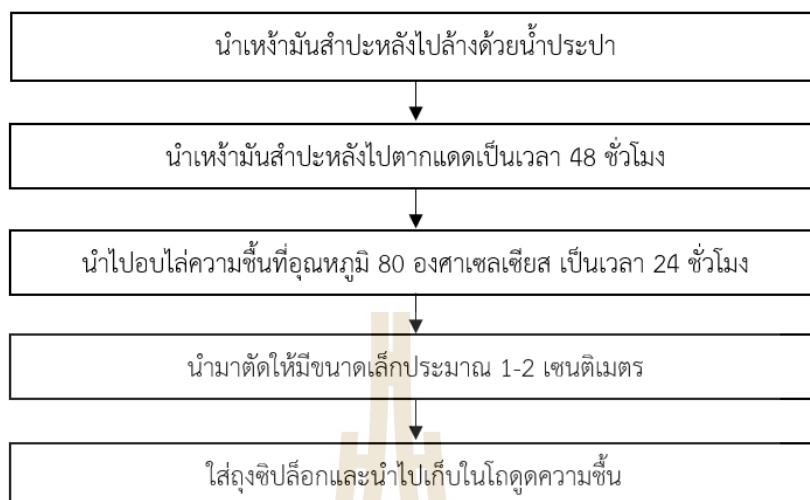
เครื่องมือหลักที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง เตาเผาท่อ แนวนอน (Furnace Tube) เตาให้ความร้อน (Hotplate) เครื่องกรองสุญญากาศ (Filter Glass Vacuum) เครื่องเขย่าแบบเคลื่อนที่เชิงเส้น (Reciprocating Shaker) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FTIR) เครื่องวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ (CHNS) เครื่องถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์สามมิติระดับจุลภาคด้วยเอกซเรย์พลังงานสูงจากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอน (XTM) เครื่องวิเคราะห์หาพื้นที่และความพรุนของอนุภาค (BET) เครื่องวิเคราะห์สารด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟีชนิดของเหลวสมรรถนะสูงสมรรถนะสูง (HPLC) และเครื่องแก้วต่าง ๆ เครื่องเขย่าแบบเคลื่อนที่เชิงเส้น (Reciprocating Shaker) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FTIR) เครื่องวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ (CHNS) เครื่องถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์สามมิติระดับจุลภาคด้วยเอกซเรย์พลังงานสูงจากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอน (XTM) เครื่องวิเคราะห์หาพื้นที่และความพรุนของอนุภาค (BET) เครื่องวิเคราะห์สารด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟีชนิดของเหลวสมรรถนะสูงสมรรถนะสูง (HPLC) และเครื่องแก้วต่าง ๆ

3.2 การสังเคราะห์ไบโอชาร์จากเหง้ามันสำปะหลัง

การศึกษาการสังเคราะห์ไบโอชาร์ โดยใช้ชีวมวลจากเหง้ามันสำปะหลัง และทำการสังเคราะห์โดยใช้เตาเผาท่อแนวนอนในการไพโรไลซิส และทำการเลือกไบโอชาร์ที่ได้จากการสังเคราะห์ โดยนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติด้วยเทคนิคต่าง ๆ ได้แก่ CHNS FTIR SEM XTM BET pH_{pzc} ซึ่งจะเลือกตัวแทนไบโอชาร์ที่มีความเหมาะสมที่สุด จากเปอร์เซ็นต์คาร์บอน และอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอน ด้วยเทคนิค CHNS ส่วนเทคนิคอื่น ๆ จะนำมาใช้ในการอธิบายลักษณะด้านอื่น ๆ ของไบโอชาร์ที่ได้รับเลือก โดยการทดลองที่กล่าวมาจะมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

3.2.1 การเตรียมวัสดุชีวมวลจากเหง้ามันสำปะหลัง

นำเหง้ามันสำปะหลังไปล้างด้วยน้ำประปาเพื่อกำจัดสิ่งสกปรก และนำเหง้ามันสำปะหลังไปตากแดดเป็นเวลา 48 ชั่วโมง เพื่อให้เหง้ามันสำปะหลังแห้ง และนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมาตัดให้มีขนาดเล็กประมาณ 1 ถึง 2 เซนติเมตร เพื่อใช้ในการสังเคราะห์ไบโอชาร์ต่อไป



รูปที่ 3.1 วิธีการเตรียมวัสดุชีวมวลจากหมักน้ำสำหรับ

3.2.2 การสังเคราะห์ไบโอชาร์จากหมักน้ำสำหรับ

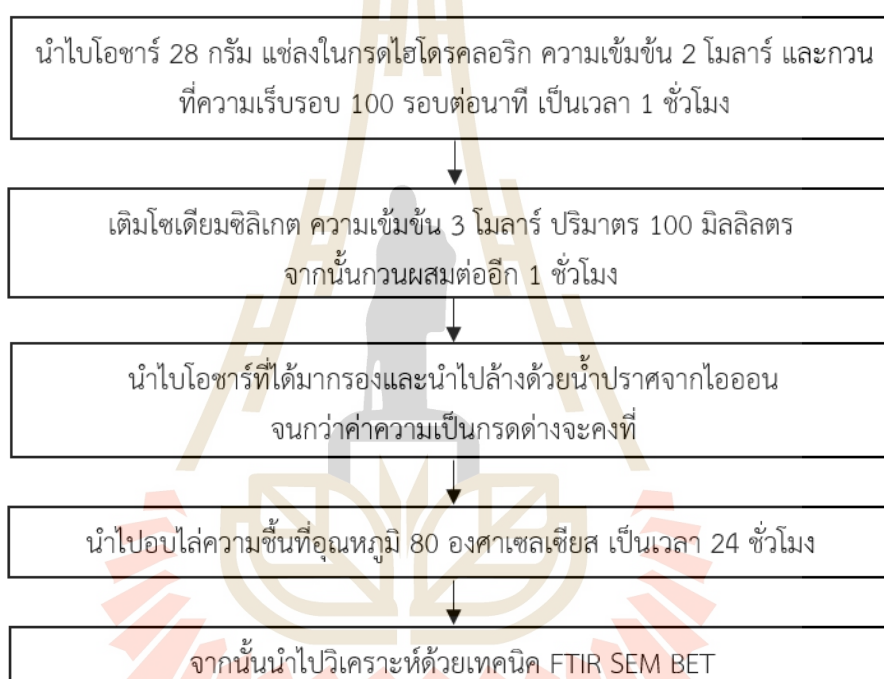
นำตัวอย่างหมักน้ำสำหรับผ่านการลดขนาดไปชั่งน้ำหนัก 10 กรัม และนำไปไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 0.5 1 1.5 2 และ 2.5 ชั่วโมง โดยมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้สภาวะแก๊สไนโตรเจน เก็บรักษาตัวอย่างในโถดูดความชื้น จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR SEM XTM BET



รูปที่ 3.2 วิธีการสังเคราะห์ไบโอชาร์จากหมักน้ำสำหรับ

3.2.3 การตัดแปลงไบโอชาร์ด้วยโซเดียมซิติเกด

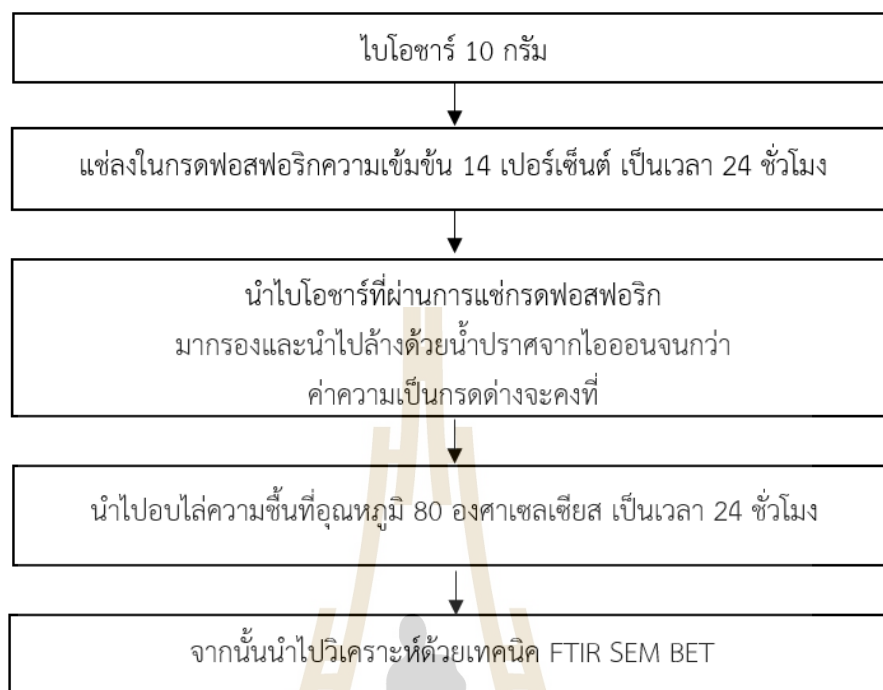
การตัดแปลงไบโอชาร์ด้วยโซเดียมซิติเกด จะทำการทดลองโดยใช้ไบโอชาร์จำนวน 28 กรัม แสงในกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 2 โมลาร์ และกวนที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นเติม โซเดียมซิติเกด ความเข้มข้น 3 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร จากนั้นกวนผสมต่ออีก 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไบโอชาร์มากรองและนำไปล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน จนกว่าค่าความเป็นกรดต่างจะคงที่ จากนั้นนำไบโอชาร์ที่ตัดแปลงด้วยโซเดียมซิติเกดที่ได้จากการกรองไปอบไล่ความชื้นที่ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR SEM BET



รูปที่ 3.3 วิธีการการตัดแปลงไบโอชาร์ด้วยโซเดียมซิติเกด

3.2.4 การตัดแปลงไบโอชาร์ด้วยกรดฟอสฟอริก

การตัดแปลงไบโอชาร์ด้วยกรดฟอสฟอริกจะทำการทดลองโดยใช้ไบโอชาร์จำนวน 10 กรัม แสงในกรดฟอสฟอริก ความเข้มข้น 14 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไบโอชาร์ที่แ่กรดฟอสฟอริกมากรองแยกเฉพาะไบโอชาร์ และนำไบโอชาร์ที่แยกออกมาไปล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน จนกว่าค่าความเป็นกรดต่างจะคงที่ หลังจากนั้นนำไบโอชาร์ที่ตัดแปลงด้วยกรดฟอสฟอริกที่ได้จากการกรองไปอบไล่ความชื้นที่ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR SEM BET

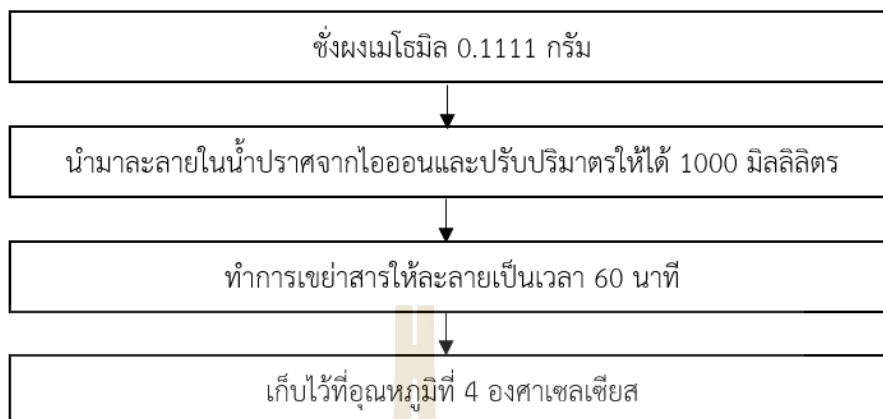


รูปที่ 3.4 วิธีการการดัดแปลงไปโอซาร์ด้วยกรดฟอสฟอริก

3.3 การบำบัดเมธิล

3.3.1 การเตรียมสารละลายเมธิล

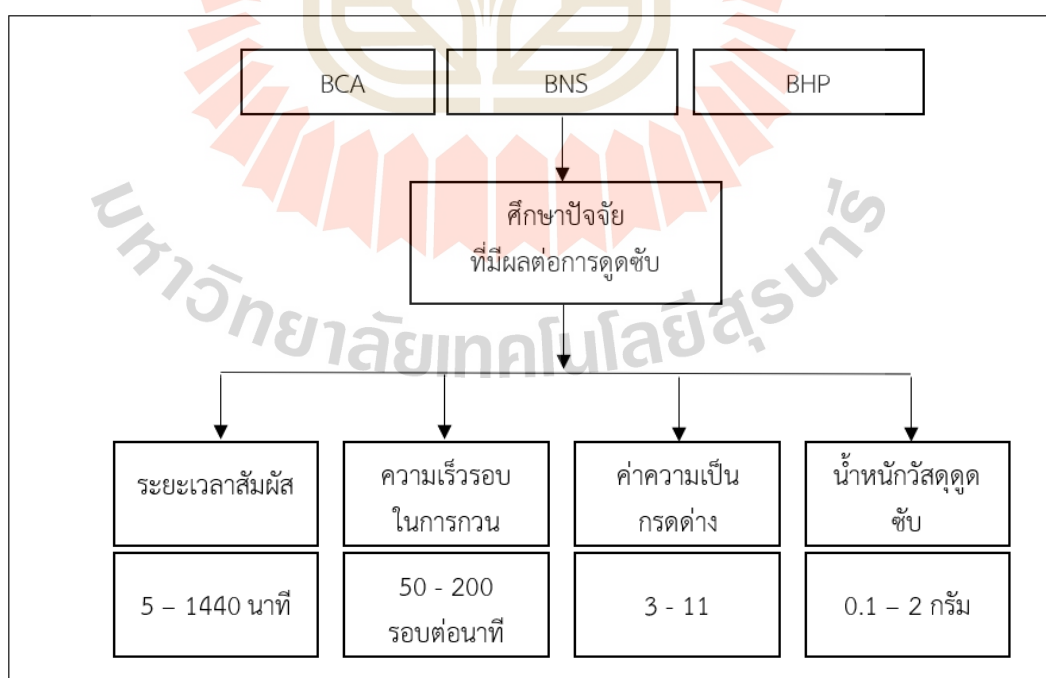
การเตรียมสารละลายมาตรฐานจะเตรียมที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (Stock Solution) โดยทำการชั่งผงเมธิล (ความเข้มข้น 90 เปอร์เซ็นต์) ปริมาณ 0.1111 กรัม ลงในปิ๊กเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร ละลายในน้ำปราศจากไอออน จากนั้นทำการปรับปริมาตรในขวดปรับปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร เขย่าให้สารละลายเข้ากันและเก็บ Stock Solution ของสารละลายเมธิล โดยการแช่ในอุณหภูมิที่ 4 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.5 วิธีเตรียมสารละลายเมโรมิล

3.3.2 การศึกษาปัจจัยในการบำบัดเมโรมิล

การศึกษาการบำบัดเมโรมิล โดยใช้ตัวแทนจากไบโอชาร์ทั้งสามชนิด ได้แก่ BCA BNS และ BHP ที่สังเคราะห์ขึ้นเองจากการทดลองข้างต้น โดยการบำบัดเมโรมิลจะทำการศึกษาปัจจัยของการบำบัด ได้แก่ ระยะเวลาสัมผัส ความเร็วรอบในการกวน ค่าความเป็นกรดต่าง น้ำหนักวัสดุดูดซับ ซึ่งความเข้มข้นของเมโรมิลจะได้รับการตรวจวัดด้วยเครื่อง HPLC แล้วหาแนวโน้มประสิทธิภาพการบำบัดเมโรมิลเทียบกับเวลา รายละเอียดชุดการศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 3.6



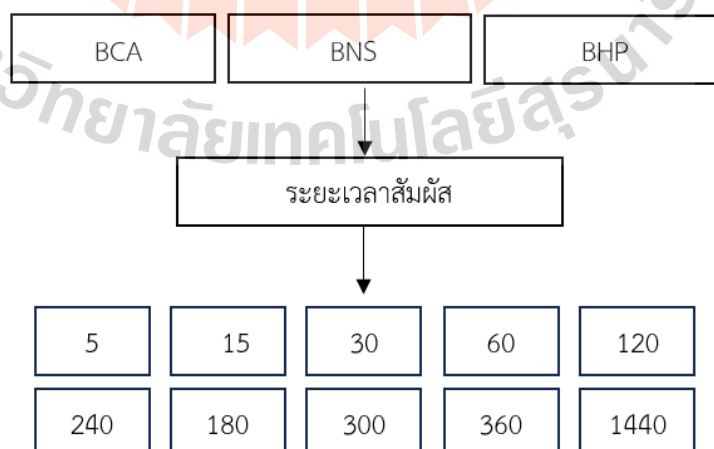
รูปที่ 3.6 รายละเอียดขั้นตอนการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

3.3.2.1 การศึกษาผลของระยะเวลาสัมพัทธ์

นำตัวอย่างไบโอซาร์ BCA BNS และ BHP นำมาศึกษาผลของระยะเวลาสัมพัทธ์ต่อการดูดซับเมโทมิลของไบโอซาร์โดยนำ 30 มิลลิลิตร ของเมโทมิลความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ค่าความเป็นกรดต่างเริ่มต้น ในช่วง 5.50 ถึง 6.50 ใส่ในขวดแก้วใสสารตัวอย่างขนาด 40 มิลลิลิตร (Amber Glass Sample Vial) จากนั้นนำไบโอซาร์ใส่ลงในขวดแก้วใสสารตัวอย่าง 30 มิลลิกรัมจากนั้นทำการเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบเคลื่อนที่เชิงเส้นที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เพื่อให้เกิดการผสมกันตลอดเวลาทำปฏิกิริยา เริ่มเก็บน้ำตัวอย่างที่เวลา 5 15 30 60 120 180 240 300 360 และ 1,440 นาที โดยเก็บตัวอย่างครั้งละ 3 มิลลิลิตร แล้วกรองด้วย Syringe Filter ขนาด 0.45 ไมครอน ลงขวดแก้วใสสารตัวอย่างขนาด 2 มิลลิลิตร แล้วนำไปวัดความเข้มข้นของเมโทมิลที่หลงเหลืออยู่ด้วยเครื่อง HPLC รายละเอียดของสภาวะในการศึกษารูปในตารางที่ 3.1 และรายละเอียดชุดการทดลองทั้งหมดแสดงในรูปที่ 3.7

ตารางที่ 3.1 สภาวะในการศึกษาผลของระยะเวลาสัมพัทธ์ต่อการดูดซับเมโทมิลของไบโอซาร์

ปัจจัย	หน่วย	ค่า
ความเข้มข้นเริ่มต้น	มิลลิกรัมต่อลิตร	10
ปริมาตร	มิลลิลิตร	30
น้ำหนักไบโอซาร์	มิลลิกรัม	30
ความเร็วรอบ	รอบต่อนาที	200
ระยะเวลาสัมพัทธ์	นาที	5 15 30 60 120 180 240 300 360 และ 1,440
ค่าความเป็นกรดต่าง	-	5.5-6.5



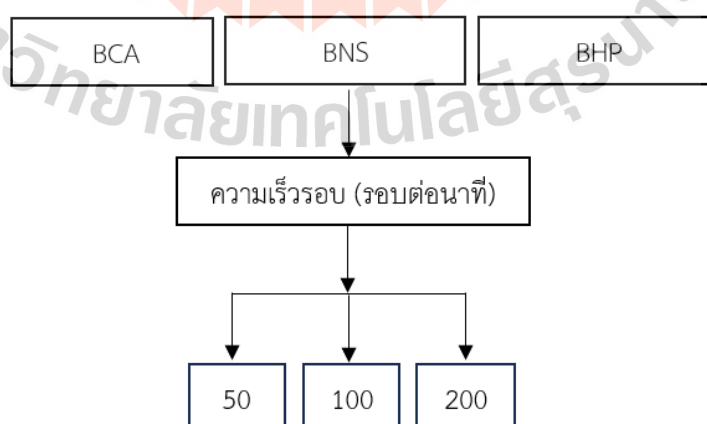
รูปที่ 3.7 แผนผังการศึกษาผลของระยะเวลาสัมพัทธ์ต่อการดูดซับเมโทมิลของไบโอซาร์

3.3.2.2 การศึกษาผลของความเร็รรอบในการกวน

นำตัวอย่างไบโอซาร์ BCA BNS และ BHP นำมาศึกษาผลของความเร็รรอบในการกวนต่อการดูดซับเมโรไมลของไบโอซาร์ โดยนำ 30 มิลลิลิตร ของเมโรไมลความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ค่าความเป็นกรดต่างเริ่มต้นในช่วง 5.50 ถึง 6.50 ใส่ในขวดแก้วใส่สารตัวอย่างขนาด 40 มิลลิลิตร จากนั้นนำไบโอซาร์ใส่ลงไปในขวดแก้วใส่สารตัวอย่าง 30 มิลลิกรัม จากนั้นทำการเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบเคลื่อนที่เชิงเส้น ที่ความเร็รรอบแตกต่างกัน 3 ค่า ได้แก่ ความเร็รรอบ 50 100 200 รอบต่อนาที เพื่อทำให้เกิดการผสมกันตลอดเวลาทำปฏิกิริยา เริ่มเก็บน้ำตัวอย่างที่เวลา 5 15 30 60 120 180 240 300 360 และ 1440 โดยเก็บตัวอย่างครั้งละ 3 มิลลิลิตร ซึ่งเป็นผลจากการศึกษาหัวข้อ 3.3.2.1 แล้วกรองด้วย syringe filter ขนาด 0.45 ไมครอน ลงขวดแก้วใส่สารตัวอย่างขนาด 2 มิลลิลิตร แล้วนำไปวัดความเข้มข้นของเมโรไมลที่หลงเหลืออยู่ด้วยเครื่อง HPLC รายละเอียดของสภาวะในการศึกษาสรุปในตารางที่ 3.2 และรายละเอียดชุดการทดลองทั้งหมดแสดงในรูปที่ 3.8

ตารางที่ 3.2 สภาวะในการศึกษาผลของความเร็รรอบต่อการดูดซับเมโรไมลของไบโอซาร์

ปัจจัย	หน่วย	ค่า
ความเข้มข้นเริ่มต้น	มิลลิกรัมต่อลิตร	10
ปริมาตร	มิลลิลิตร	30
น้ำหนักไบโอซาร์	มิลลิกรัม	30
ความเร็รรอบ	รอบต่อนาที	50 100 200
ระยะเวลาสัมผัส	นาที	1440*
ค่าความเป็นกรดต่าง	-	5.5-6.5



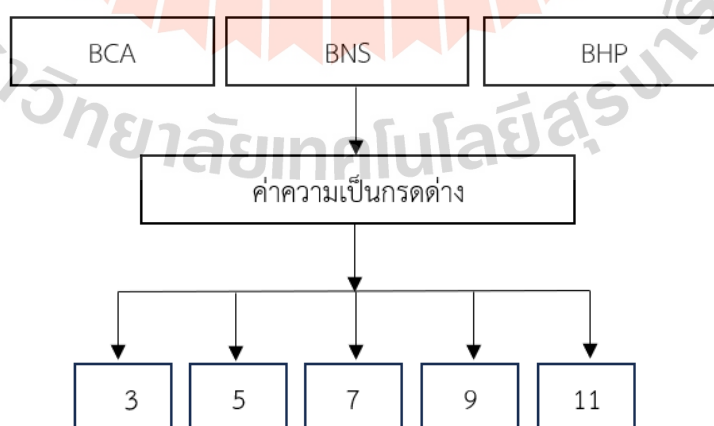
รูปที่ 3.8 แผนผังการศึกษาผลของความเร็รรอบในการกวนต่อการดูดซับเมโรไมลของไบโอซาร์

3.3.2.3 การศึกษาผลของค่าความเป็นกรดต่าง

นำตัวอย่างไบโอซาร์ BCA BNS และ BHP นำมาศึกษาผลของความเป็นกรดต่างต่อการดูดซับเมโทมิลของไบโอซาร์ โดยนำ 30 มิลลิลิตร ของเมโทมิล ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ค่าความเป็นกรดต่างให้มีค่าแตกต่างกัน 5 ค่า ได้แก่ 3 5 7 9 และ 11 ด้วยสารละลาย 0.1 นอร์มัลของกรดไฮโดรคลอริก และ 0.1 นอร์มัลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ใส่ในขวดแก้วใสสารตัวอย่างขนาด 40 มิลลิลิตร ที่จะบรรจุไบโอซาร์ จากนั้นนำไบโอซาร์แต่ละชนิด ใส่ในขวดแก้วใสสารตัวอย่าง 0.1 กรัม จากนั้นนำไปเขย่าด้วยความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ซึ่งเป็นผลจากการศึกษาหัวข้อ 3.2.2.2 เพื่อให้เกิดการผสมกันตลอดเวลาทำปฏิกิริยา มีระยะเวลาสัมผัส 1440 นาที จากนั้นเก็บตัวอย่าง 3 มิลลิลิตร แล้วกรองด้วย syringe filter ขนาด 0.45 ไมครอน ลงขวดแก้วใสสารตัวอย่างขนาด 2 มิลลิลิตร แล้วนำไปวัดความเข้มข้นของเมโทมิลที่หลงเหลืออยู่ด้วยเครื่อง HPLC รายละเอียดของสภาวะในการศึกษาสรุปในตารางที่ 3.3 และรายละเอียดชุดการทดลองทั้งหมดแสดงในรูปที่ 3.9

ตารางที่ 3.3 สภาวะในการศึกษาผลค่าความเป็นกรดต่างต่อการดูดซับเมโทมิลของไบโอซาร์

ปัจจัย	หน่วย	ค่า
ความเข้มข้นเริ่มต้น	มิลลิกรัมต่อลิตร	10
ปริมาตร	มิลลิลิตร	100
น้ำหนักไบโอซาร์	กรัม	0.1
ความเร็วรอบ	รอบต่อนาที	200*
ระยะเวลาสัมผัส	นาที	1440*
ค่าความเป็นกรดต่าง	-	3 5 7 9 และ 11



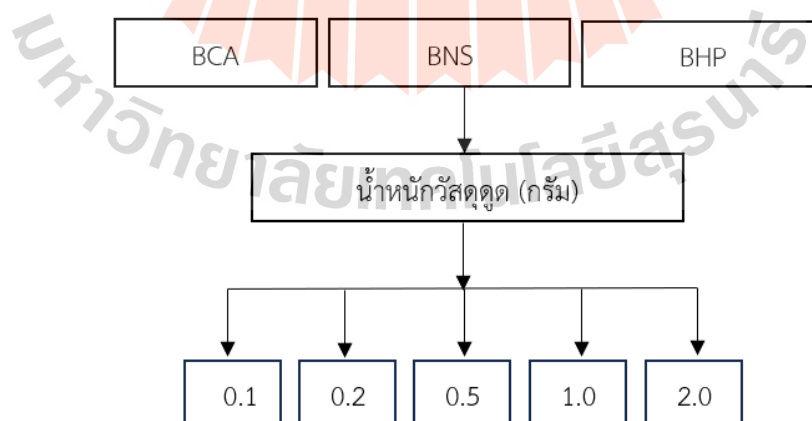
รูปที่ 3.9 แผนผังการศึกษาผลของค่าความเป็นกรดต่างต่อการดูดซับเมโทมิลของไบโอซาร์

3.3.2.4 การศึกษาผลของน้ำหนักวัสดุดูดซับ

นำตัวอย่างไบโอชาร์ BCA BNS และ BHP นำมาศึกษาผลของน้ำหนักวัสดุดูดซับต่อการดูดซับเมโรไมลของไบโอชาร์โดยนำ 10 มิลลิลิตร ของเมโรไมล ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ค่าความเป็นกรดต่างเริ่มต้น ในช่วง 5.50 ถึง 6.00 ซึ่งเป็นผลจากการศึกษาหัวข้อ 3.3.2.3 ใส่ในขวดแก้วใสสารตัวอย่างขนาด 40 มิลลิลิตร ที่บรรจุไบโอชาร์แต่ละชนิด จากนั้นนำไบโอชาร์ใส่ลงไปในขวดแก้วใสสารตัวอย่าง ให้มีค่าแตกต่างกัน 5 ค่า ได้แก่ 0.1 0.2 0.5 1 และ 2 กรัม จากนั้นนำไปเขย่าด้วยความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เพื่อทำให้เกิดการผสมกันตลอดเวลา ทำปฏิกิริยา มีระยะเวลาสัมผัส 1440 นาที จากนั้นเก็บตัวอย่าง 3 มิลลิลิตร แล้วกรองด้วย Syringe Filter ขนาด 0.45 ไมครอน ลงขวดแก้วใสสารตัวอย่างขนาด 2 มิลลิลิตร แล้วนำไปวัดความเข้มข้นของเมโรไมลที่หลงเหลืออยู่ด้วยเครื่อง HPLC รายละเอียดของสภาวะในการศึกษาสรุปในตารางที่ 3.4 และรายละเอียดชุดการทดลองทั้งหมดแสดงในรูปที่ 3.10

ตารางที่ 3.4 สภาวะในการศึกษาผลของน้ำหนักวัสดุดูดซับต่อการดูดซับเมโรไมลของไบโอชาร์

ปัจจัย	หน่วย	ค่า
ความเข้มข้นเริ่มต้น	มิลลิกรัมต่อลิตร	10
ปริมาตร	มิลลิลิตร	100
น้ำหนักไบโอชาร์	กรัม	0.1 0.2 0.5 1.0 และ 2.0
ความเร็วรอบ	รอบต่อนาที	200*
ระยะเวลาสัมผัส	นาที	1440*
ค่าความเป็นกรดต่าง	-	5.5-6*



รูปที่ 3.10 แผนผังการศึกษาผลของน้ำหนักวัสดุดูดซับต่อการดูดซับเมโรไมลของไบโอชาร์

3.4 การวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของเมโรไมล

ทดสอบความเข้มข้นหลงเหลือของเมโรไมล ด้วยเครื่องวิเคราะห์สารด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟี ชนิดของเหลวสมรรถนะสูง HPLC รุ่น 1260 Agilent Technologies เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการแยกสารผสมที่อยู่ในสถานะของเหลว ซึ่งอาศัยความแตกต่างของอัตราการเคลื่อนที่ของสารประกอบที่ผ่านไป ในคอลัมน์ (เฟสที่อยู่กับที่) โดยการชะหรือการพาของเฟสเคลื่อนที่โดยเตรียมสารละลายเมโรไมล มาตรฐานความเข้มข้น 0.5 1 5 8 10 20 30 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายเมโรไมล ซึ่งกำหนดสภาวะที่เหมาะสมดังตารางที่ 3.5 จากนั้นนำความเข้มข้นของเมโรไมล มาหาแนวโน้มประสิทธิภาพการบำบัดสารเมโรไมลเทียบกับเวลา

ตารางที่ 3.5 การวิเคราะห์เมโรไมลโดยเทคนิควิเคราะห์สารด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟีชนิดของเหลวสมรรถนะสูง

ตัวแปร	สภาวะที่เหมาะสม
1. คอลัมน์	Hypersil ODS, C18 (5 ไมโครเมตร 4.0 × 250 นาโนเมตร)
2. ปริมาตรที่สารฉีดเข้าเครื่อง	20 ไมโครลิตร
3. สัดส่วนเฟสเคลื่อนที่	A (65 เปอร์เซ็นต์) คือ อะซิโตนไนโตรที่ B (35 เปอร์เซ็นต์) คือ น้ำปราศจากไอออน
4. อัตราการไหล	0.5 มิลลิิตรต่อนาที
5. ระยะเวลาในการวิเคราะห์ตั้งต้น	15 นาที
6. ความยาวคลื่น	234 นาโนเมตร

คำนวณประสิทธิภาพการบำบัดสารละลายเมโรไมล

$$\text{ประสิทธิภาพ (Efficiency)} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \quad (11)$$

เมื่อ C_0 = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเมโรไมล

C_t = ความเข้มข้นของสารละลายเมโรไมลหลังการทดลอง ตามเวลาต่าง ๆ

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) เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FTIR) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เทคนิคการถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์สามมิติระดับจุลภาคด้วยเอกซเรย์พลังงานสูงจากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอน (XTM) เทคนิควิเคราะห์หาพื้นที่และความพรุนของอนุภาค (BET) เทคนิคการวิเคราะห์ค่าประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ (pH_{pzc}) ซึ่งจะเลือกตัวแทนไบโอชาร์ที่มีความเหมาะสมที่สุด จากเปอร์เซ็นต์คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และอัตราสัดส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอน 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

จึงไม่เลือกตัวอย่างที่สังเคราะห์จากอุณหภูมิต่ำกว่า 300 องศาเซลเซียสไปศึกษาต่อ สำหรับการสังเคราะห์ไบโอชาร์จากเหง้ามันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 0.5 1 1.5 2 และ 2.5 ชั่วโมง ที่ภายใต้สภาวะแก๊สไนโตรเจนโดยมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิตั้งแต่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่าลักษณะทางกายภาพของไบโอชาร์ที่เวลา 0.5 ถึง 1.5 ชั่วโมง จะมีลักษณะของสีค่อนข้างเป็นสีน้ำตาล ผสมดำจึงสันนิษฐานว่ามีการเผาไหม้ที่ยังไม่สมบูรณ์จึงไม่นำไปศึกษาต่อ แต่ลักษณะทางกายภาพของไบโอชาร์ที่เวลา 2 ถึง 2.5 ชั่วโมง มีสีที่ดำสนิทจึงสันนิษฐานว่ามีการกลายเป็นไบโอชาร์ที่สมบูรณ์จึงจะนำไปศึกษาต่อ และจากการสังเคราะห์ไบโอชาร์จากเหง้ามันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0.5 1 1.5 2 และ 2.5 ชั่วโมง ที่ภายใต้สภาวะแก๊สไนโตรเจนโดยมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิตั้งแต่ 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



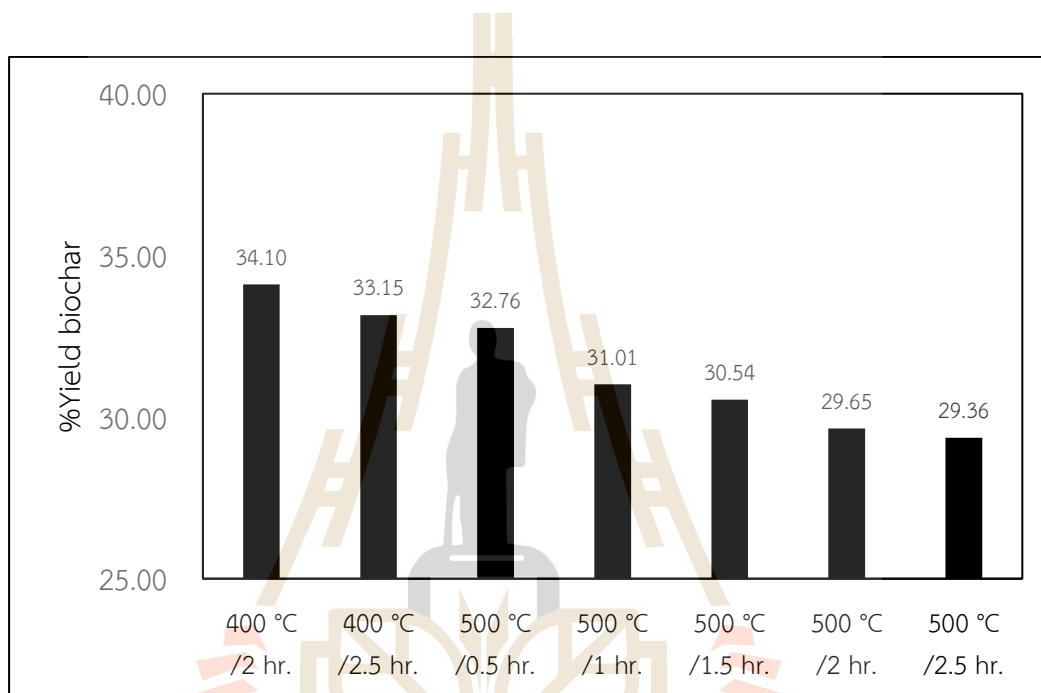
ตารางที่ 4.1 ลักษณะรูปทางกายภาพการสังเคราะห์ไบโอชาร์จากเหง้ามันสำปะหลังที่อุณหภูมิต่าง ๆ

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 นั้นหมายความว่า

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

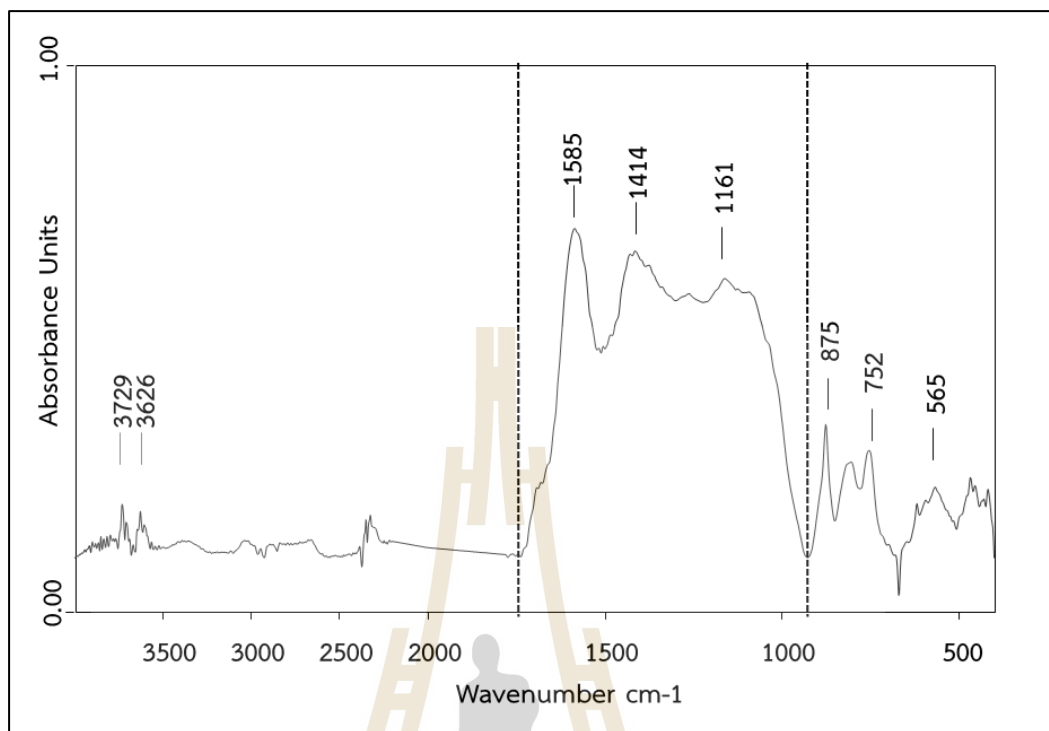
จากตารางที่ 4.2 สามารถอธิบายสัดส่วน คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ของไบโอชาร์ ได้ดังนี้ ไบโอชาร์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส และมีการเพิ่มระยะเวลาในการไพโรไลซิส จาก 2 ชั่วโมงเป็น 2.5 ชั่วโมง ปริมาณคาร์บอนสูงสุดของไบโอชาร์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส คือไบโอชาร์ที่ใช้ระยะเวลาในการไพโรไลซิส 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 อุณหภูมิที่สูงขึ้นยังทำให้ไบโอชาร์มีคาร์บอนที่เสถียรที่มีความคงตัว สูงขึ้น และเกิดการสร้างโครงสร้างที่มีวงอะโรมาติก ซึ่งมีลักษณะเป็นโครงสร้างวงแหวนของอะตอม

คาร์บอนที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะคู่ที่สลับกับพันธะเดี่ยว การเกิดโครงสร้างอะโรมาติก หมายถึง การที่ไบโอซาร์จะมีความคงทนต่อการย่อยสลาย และจะมีความเสถียรสูง ส่วนปริมาณของไฮโดรเจนจะลดลงเมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการไพโรไลซิสเพิ่มขึ้น ซึ่งจะเกิดจากสลายตัวของน้ำและการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบมากขึ้นของคาร์บอนในสารประกอบอะโรมาติกในส่วนประกอบของชีวมวลส่งผลให้อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนลดลงตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของความเสถียรทางเคมีของไบโอซาร์ เนื่องจากสารประกอบที่ประกอบด้วยไฮโดรเจนและไนโตรเจนส่วนใหญ่ถูกสลายตัวออกไปแล้ว นั้นหมายความว่าอุณหภูมิการไพโรไลซิสเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อคุณสมบัติของไบโอซาร์ (Wijitkosum & Jiwnok, 2019; Khater et al., 2024)

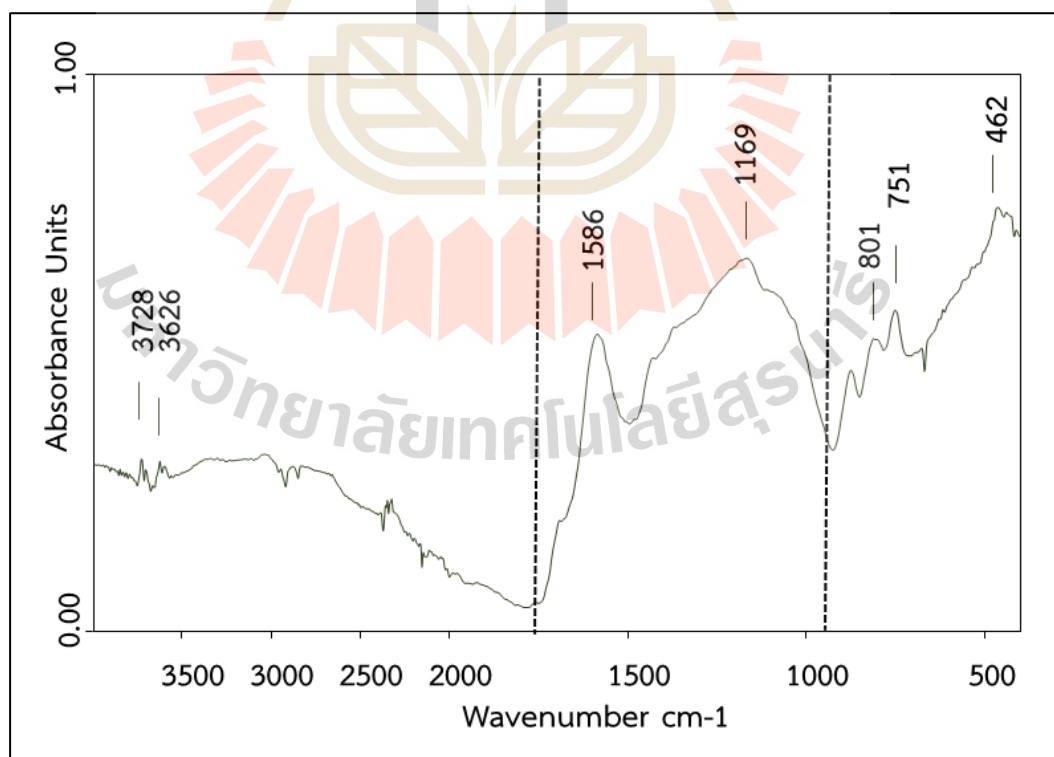
จากตารางที่ 4.2 พบว่าไบโอซาร์ทั้ง 7 ตัวอย่าง มีคุณสมบัติผ่านเกณฑ์ของ EBC 2012 โดยกำหนดปริมาณคาร์บอนของไบโอซาร์ต้องมีปริมาณคาร์บอนทั้งหมดอย่างน้อย 50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจากตารางที่ 4.2 พบว่าไบโอซาร์ทุกตัวอย่างมีปริมาณคาร์บอนในช่วง 73.0770 ถึง 78.1490 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด แสดงถึงความสามารถในการกักเก็บคาร์บอนที่ดี และอัตราสัดส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนของ EBC 2012 กำหนดให้ปริมาณอัตราสัดส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.7 ซึ่งอัตราสัดส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนจากการสังเคราะห์อยู่ในช่วง 0.0261 ถึง 0.0577 ซึ่งต่ำกว่าค่าที่กำหนด แสดงให้เห็นว่าไบโอซาร์จากการสังเคราะห์มีเสถียรภาพทางเคมีสูง และเหมาะสมสำหรับการใช้งาน เพราะฉะนั้นจะทำการคัดเลือกไบโอซาร์จากปริมาณคาร์บอนที่สูงที่สุด และอัตราสัดส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนที่ต่ำที่สุด คือไบโอซาร์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 2.5 ชั่วโมง เนื่องจากงานวิจัย Wijitkosum, S., & Jiwnok, P., 2019 ระบุว่าไบโอซาร์ที่มีคุณภาพที่ดีและมีความเสถียรจะมีปริมาณคาร์บอนที่สูง นอกจากนี้อัตราสัดส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนที่ต่ำซึ่งถึงโครงสร้างอะโรมาติกที่สูงขึ้น และอัตราสัดส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนที่ต่ำ เป็นตัวชี้วัดของความคงทนของไบโอซาร์ต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์และสารเคมี (Varjani, S., Kumar, G., & Rene, E. R., 2019) และงานวิจัยของ Mimmo et al., 2014 ระบุว่าความสัมพันธ์ของอุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิส และระดับความเป็นอะโรมาติกของไบโอซาร์พบว่าเมื่ออุณหภูมิการไพโรไลซิสเพิ่มขึ้น ค่าอัตราสัดส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนจะลดลง และเกิดการเพิ่มขึ้นของโครงสร้างอะโรมาติก ซึ่งส่งผลให้ความเสถียรของไบโอซาร์เพิ่มขึ้นและมีความสามารถในการดูดซับสารมลพิษมากขึ้น

4.1.4 เทคนิคฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FTIR)

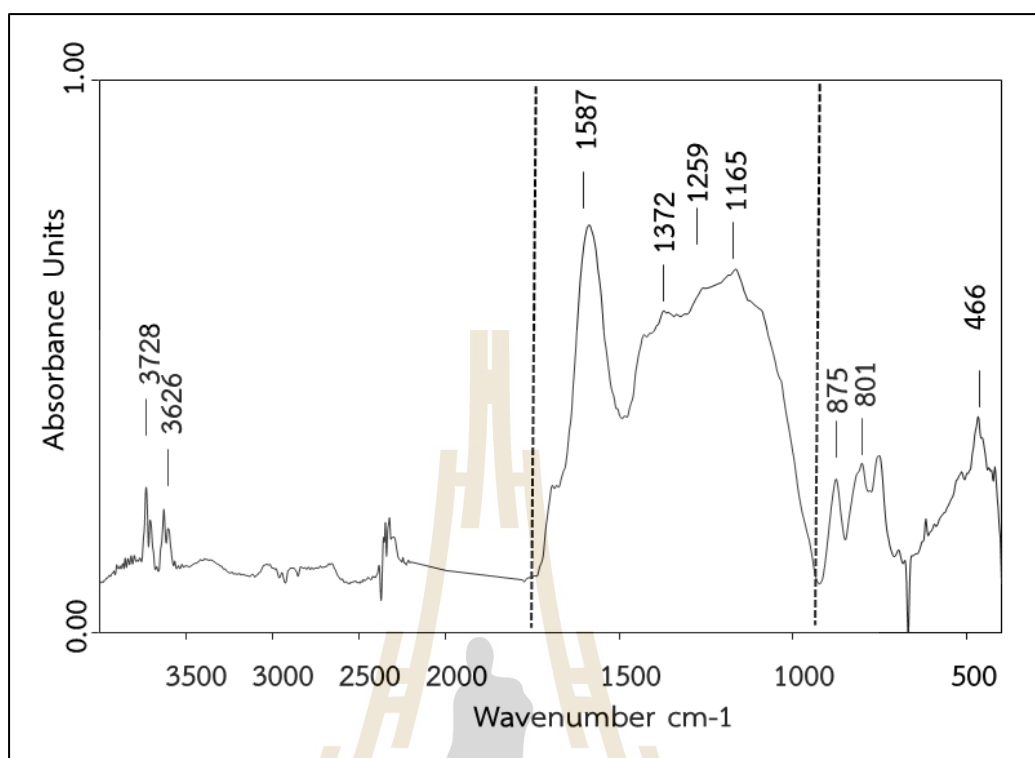
เป็นวิธีการวิเคราะห์ที่ใช้ในการศึกษา และระบุสมบัติทางเคมีของวัสดุ โดยการตรวจวัดการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของตัวอย่าง FTIR สามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างทางโมเลกุล และการปรากฏตัวของกลุ่มฟังก์ชันต่าง ๆ ในไบโอซาร์ได้ สำหรับผลของ FTIR ได้ทำการเปรียบเทียบลักษณะสเปกตรัม ของ BCA BNS และ BHP ดังรูปที่ 4.2 4.3 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 $-\text{CH}_2$ 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 $-\text{CH}_2$ 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). ที่ระบุไว้ว่าหลังการดัดแปลงด้วยไฮเดียมซัลไฟด์ แสดงให้เห็นถึงการเกิดหมู่ พันธะ Si-O-Si Stretching, พันธะ Si-O และ Si-OH, พันธะ Si-O-Si หรือ Si-O-C เพิ่มขึ้นจากโครงสร้างเดิม ซึ่งหมายถึงพื้นผิวของไบโอชาร์จะมีหมู่ฟังก์ชันที่มีพันธะไฮโดรเจน และพันธะซัลฟิดเพิ่มขึ้น 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
	ตำแหน่งพิก (ซม. ⁻¹)	ตำแหน่งพิก (ซม. ⁻¹)	
-OH stretching	3729-3626	3338-3344	บ่งชี้ถึงหมู่ฟังก์ชัน ออกซิเจนที่เหลื่ออยู่
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

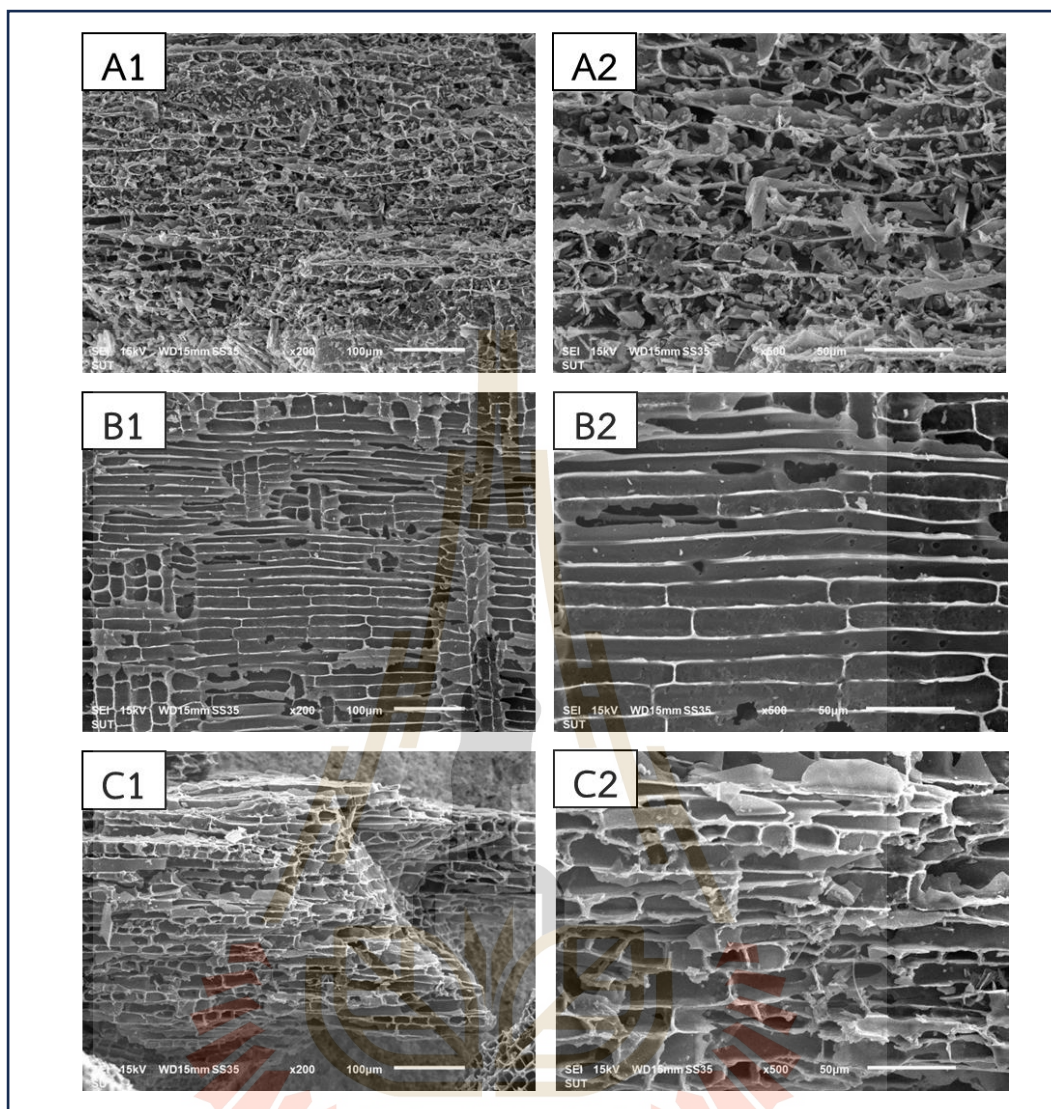
ตารางที่ 4.5 ลักษณะการสั่นสะเทือนและฟังก์ชันการทำงานของไบโอชาร์จากเหง้ามันสำปะหลังที่ดัดแปลงด้วยกรดฟอสฟอริก

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 มีลักษณะเป็นผิวร่วนที่มีลักษณะการจัดเรียงกันอย่างไม่เป็นระเบียบ 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)

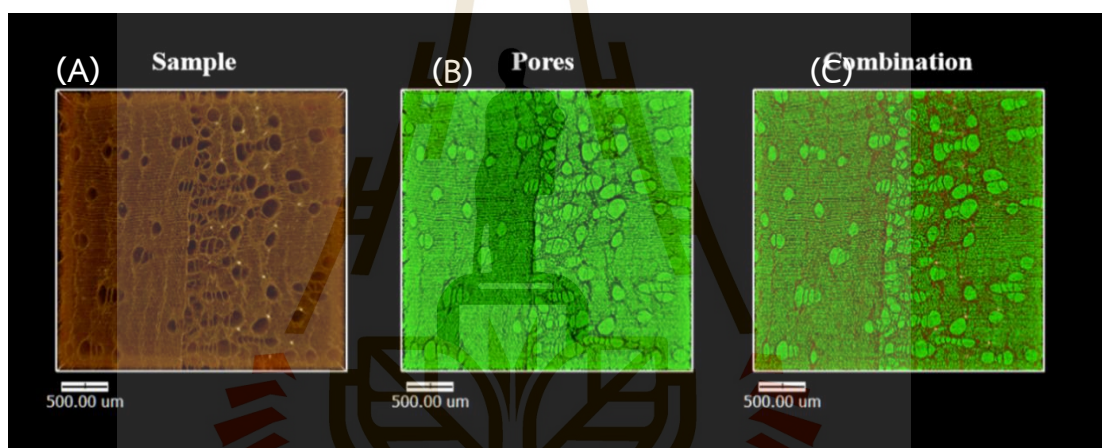


รูปที่ 4.5 ภาพถ่าย SEM ของ BCA ที่กำลังขยาย 200X (A1) กับ 500X (A2) ภาพถ่าย SEM ของ BNS ที่กำลังขยาย 200X (B1) กับ 500X (B2) และภาพถ่าย SEM ของ BHP ที่กำลังขยาย 200X (C1) กับ 500X (C2)

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 ซึ่งจะแทนที่ของพื้นผิวสัมผัสของไบโอชาร์ 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 ซึ่งจะมีผลสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นที่กล่าวว่า 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

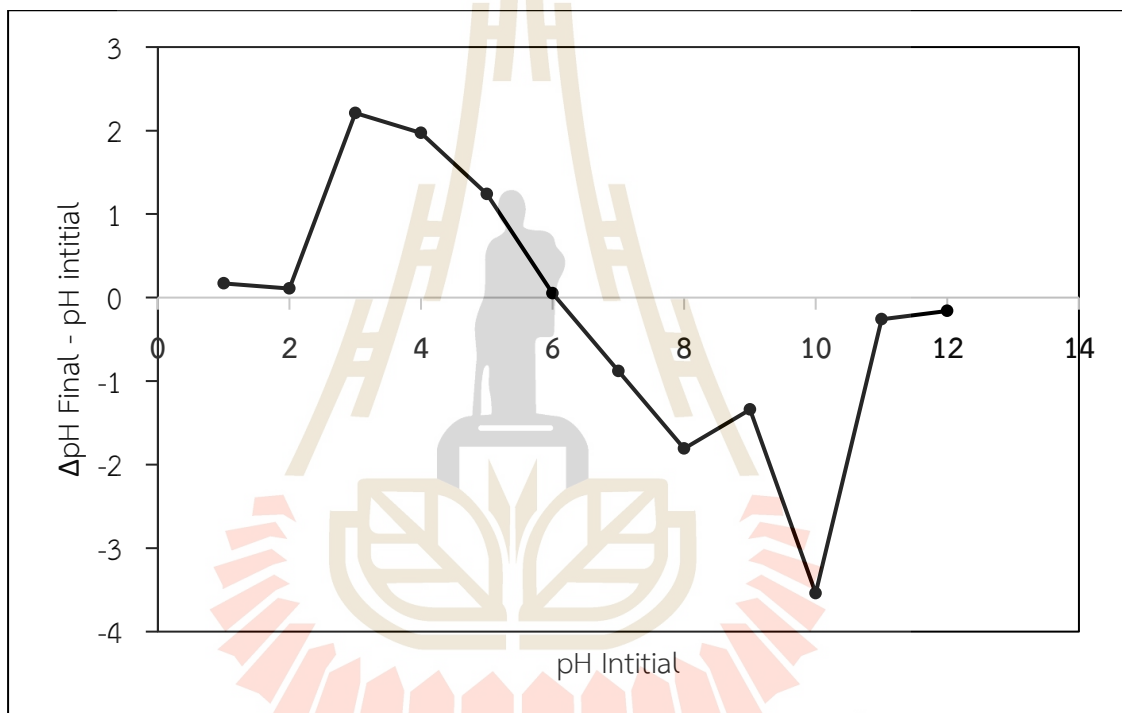
ตารางที่ 4.6 คุณสมบัติทางกายภาพของไบโอชาร์

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

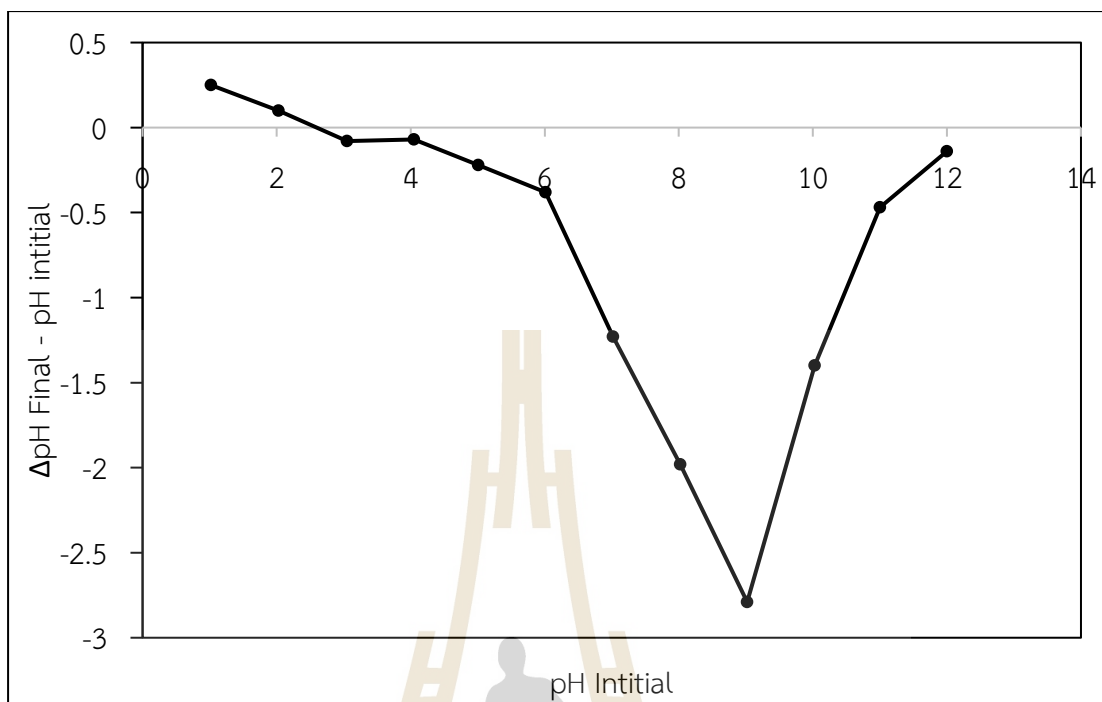
4.1.8 เทคนิคการวิเคราะห์ค่าประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ (pH_{pzc})

จากผลการศึกษาระดับปริญญาโทที่แสดงประจุบนพื้นผิวตัวดูดซับ 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

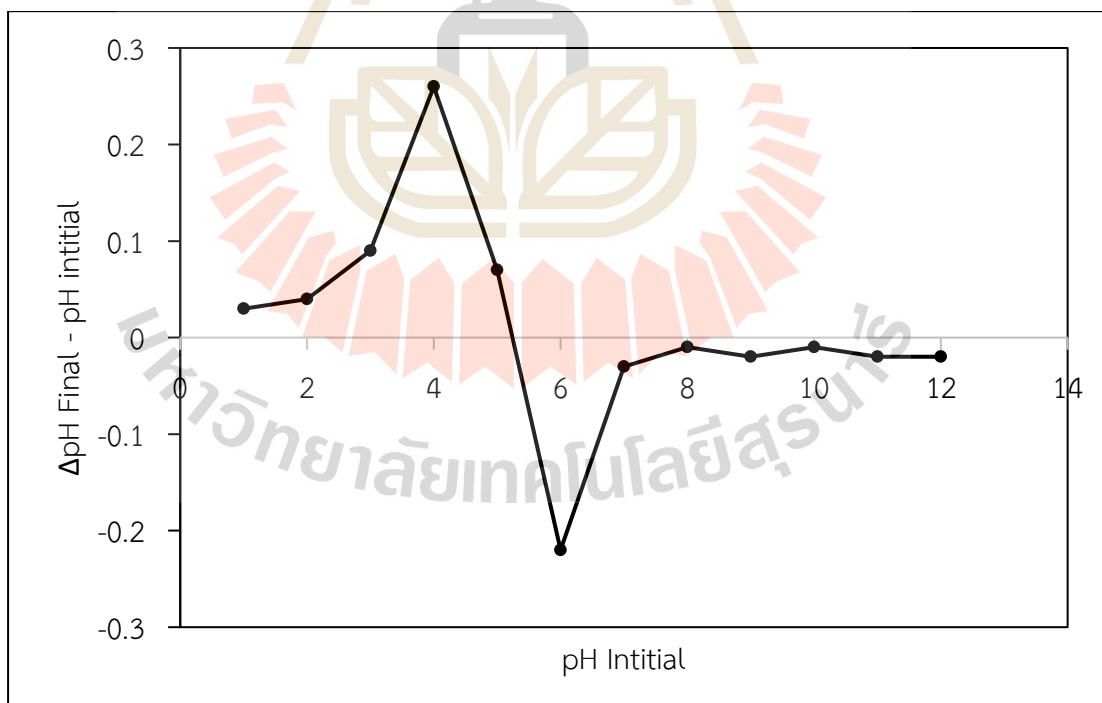
หลักในการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ที่เป็นไอออนิกและไอออนไนซ์ได้ นั้นหมายความว่าเมื่อสารละลายมีค่าต่ำกว่าค่าประจุพื้นผิวเป็นศูนย์จะส่งผลให้ประจุบนพื้นผิวมีค่าเป็นบวก และจะสามารถดูดซับการสารที่มีประจุได้ดี (Mukherjee et al., 2011) สำหรับ BNS ค่าประจุพื้นผิวเป็นศูนย์เท่ากับ 2.60 ดังแสดงในรูปที่ 4.8 การดัดแปลงด้วยโซเดียมซิลิเกตทำให้พื้นผิวมีคุณสมบัติเป็นด่างเมื่อค่าประจุพื้นผิวเป็นศูนย์มากกว่า 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

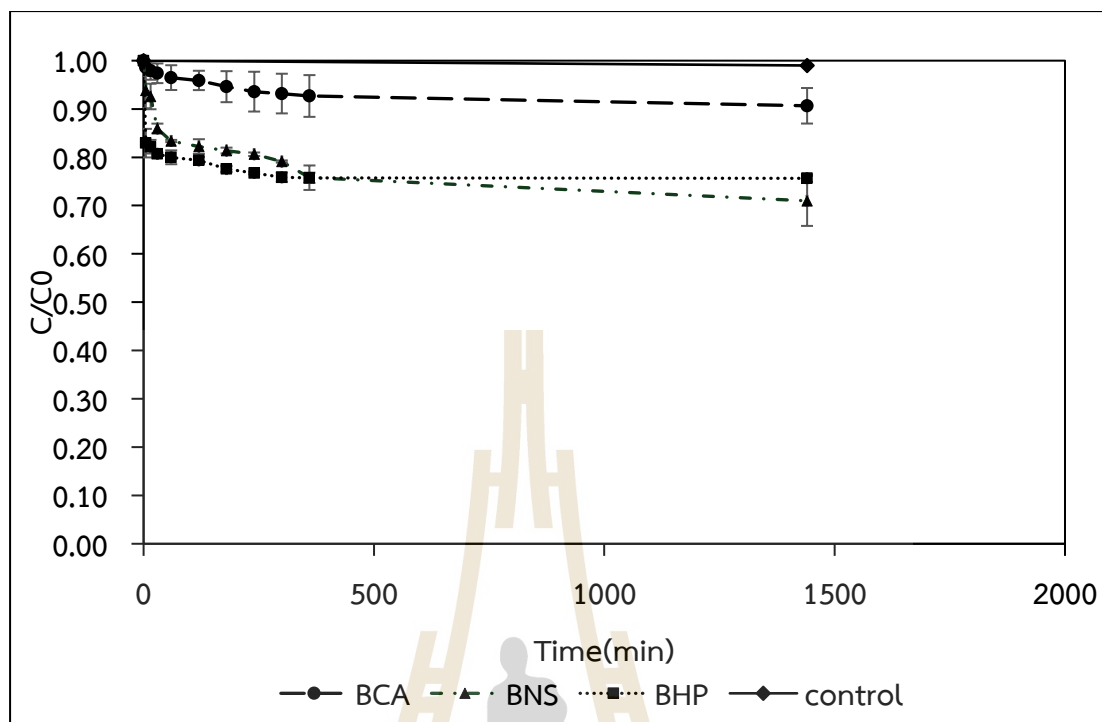
4.2 ผลการศึกษาผลการบำบัดเมโรมิล

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 ซึ่งสอดคล้องกับการดูดซับด้วยไบโอชาร์ของ Inyang & Dickenson, 2015 สามารถสรุปได้ว่า การดัดแปลงไบโอชาร์ด้วยไฮเดียมซัลไฟด์และกรดฟอสฟอริกช่วยเพิ่มหมู่ฟังก์ชันที่เอื้อต่อการดูดซับ และทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดเมโรมิลดีขึ้น โดยเฉพาะในกรณีของเมโรมิลที่ต้องอาศัยทั้งกลไกทางกายภาพและทางเคมีในการดูดซับเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ

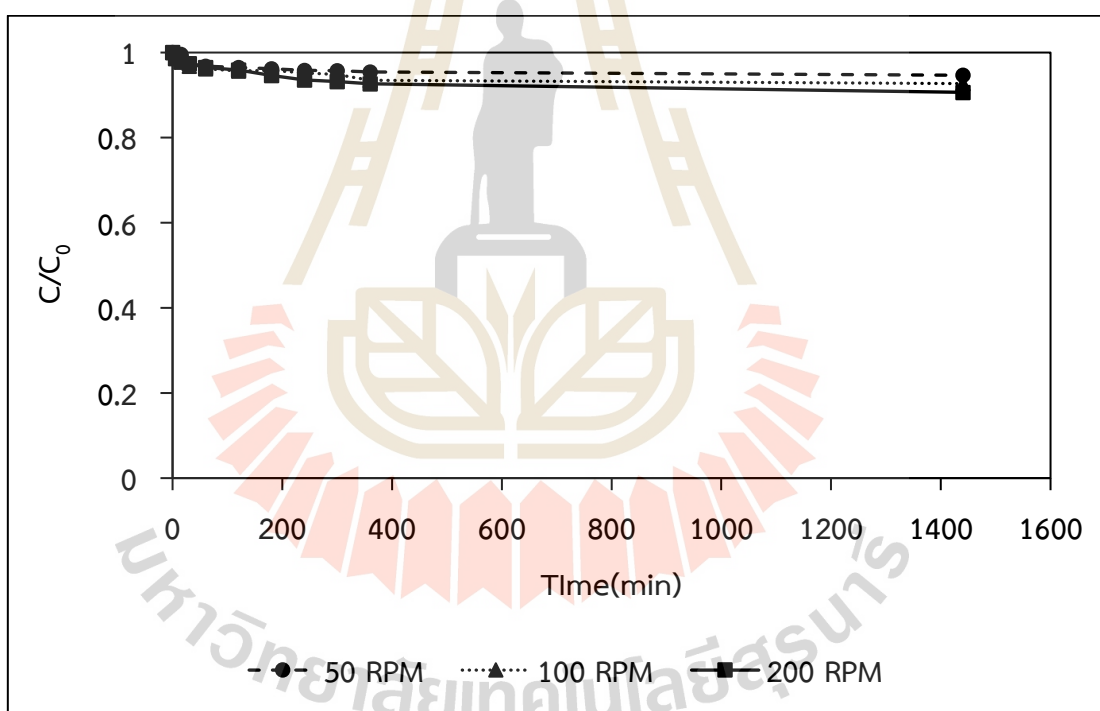


รูปที่ 4.10 ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับเมโรไมลของ ไบโอดีจากเหง้า
มันสำปะหลัง BCA BNS และ BHP

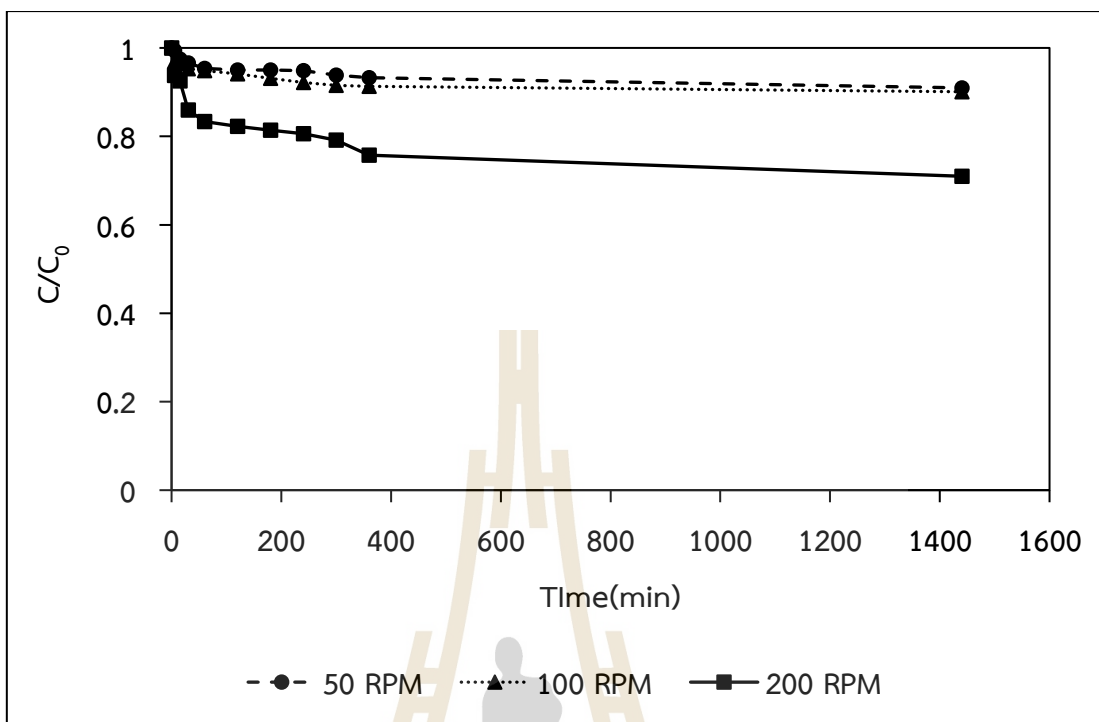
4.2.2 ผลของค่าความเร็วรอบต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

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 ก่อนข้างคงที่ในทุกความเร็วรอบ 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 เนื่องจาก โครงสร้างพื้นผิว 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

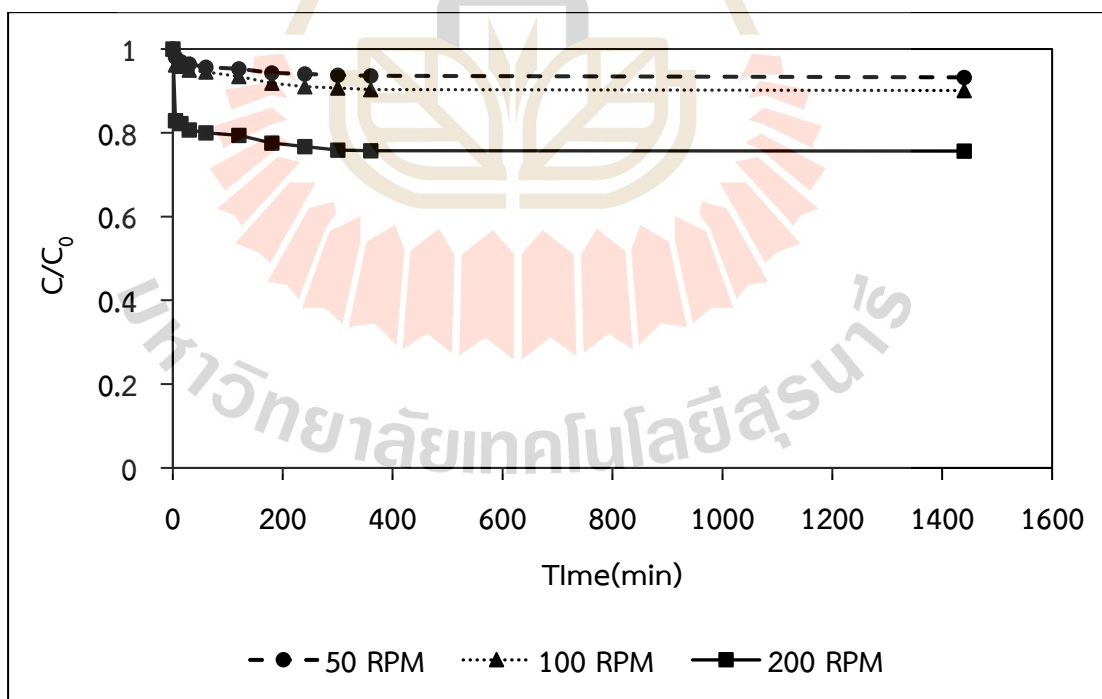
การศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าความเร็วรอบมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับเมธิลีน โดยเฉพาะในไบโอชาร์ที่ผ่านการดัดแปลง BNS และ BHP ซึ่งสามารถอธิบายผลกระทบที่เกิดขึ้นได้จาก ผลของการถ่ายโอนมวล (Mass transfer) เมื่อความเร็วรอบสูงขึ้นจะช่วยลด Boundary Layer ที่อยู่รอบ ๆ อนุภาคไบโอชาร์ทำให้โมเลกุลของเมธิลีนสามารถเข้าสู่รูพรุนของไบโอชาร์ได้เร็วขึ้น 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



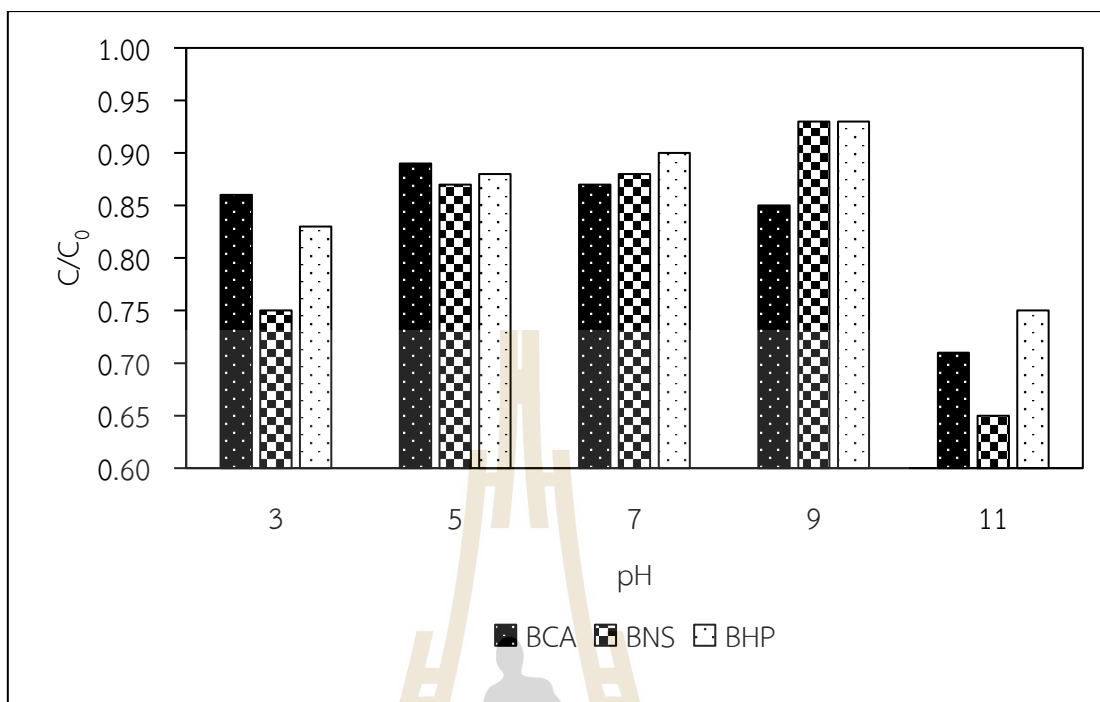
รูปที่ 4.12 ผลของความเร็วยรอบต่อการดูดซับเมธิลเรดด้วย BNS



รูปที่ 4.13 ผลของความเร็วยรอบต่อการดูดซับเมธิลเรดด้วย 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 ซึ่งเป็นผลมาจากการสลายตัวของเมโรมิลในสถานะต่างแก่ 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 ในสถานะกรดที่ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 3 โดย BNS มีค่า C/C_0 เท่ากับ 0.75 และ BHP มีค่า C/C_0 เท่ากับ 0.83 ซึ่งความสามารถในการดูดซับนี้สัมพันธ์กับค่าประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ของ BNS มีประจุพื้นผิวเป็นศูนย์เท่ากับ 2.60 ส่งผลให้พื้นผิวมีประจุลบในสถานะค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 3 ทำให้ไบโอชาร์มีความสามารถในการดูดซับสารที่มีประจุบวกได้ดี ซึ่งในสถานะที่พีเอช 3 กลุ่มฟังก์ชันของเมโรมิลที่อยู่ในกลุ่มคาร์บาเมทจะมีประจุเป็นบวก (Atkins, P., & de Paula, J., 2010) ส่งผลให้เมโรมิล และไบโอชาร์จะเกิดการดึงดูดกันโดยกลไกไฟฟ้าสถิตมาเสริมทำให้ประสิทธิภาพดีขึ้น และ BHP มีค่าประจุพื้นผิวเป็นศูนย์เท่ากับ 5.15 ส่งผลให้พื้นผิวมีประจุบวกในสถานะค่าความเป็นกรดต่างต่ำ และสามารถจับกับเมโรมิลที่มีขั้วได้ ในขณะที่ BCA มีประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 5 มีค่า C/C_0 เท่ากับ 0.89 เนื่องจากค่าประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ของ BCA อยู่ที่ 6.05 ซึ่งเหมาะสำหรับการดูดซับในสถานะเป็นกรดถึงกลาง ซึ่งจะมีความสอดคล้องกับ Chang et al., 2008 การดูดซับมีประสิทธิภาพสูงสุดในช่วงพีเอชต่ำกว่า 5 ซึ่งเกิดจากการที่ประจุบวก (H^+) ในสารละลายเพิ่มขึ้นที่ค่าพีเอชต่ำ ส่งผลให้เมโรมิลซึ่งเป็นสารที่มีหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วหรือมีประจุลบ ถูกดึงดูดด้วยแรงไฟฟ้าสถิต กับประจุบวกบนพื้นผิวของ MN-100 การศึกษานี้ชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของค่าความเป็นกรดต่าง และการปรับปรุงพื้นผิวไบโอชาร์ในการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับที่เหมาะสมกับสารปนเปื้อนในสถานะต่าง ๆ

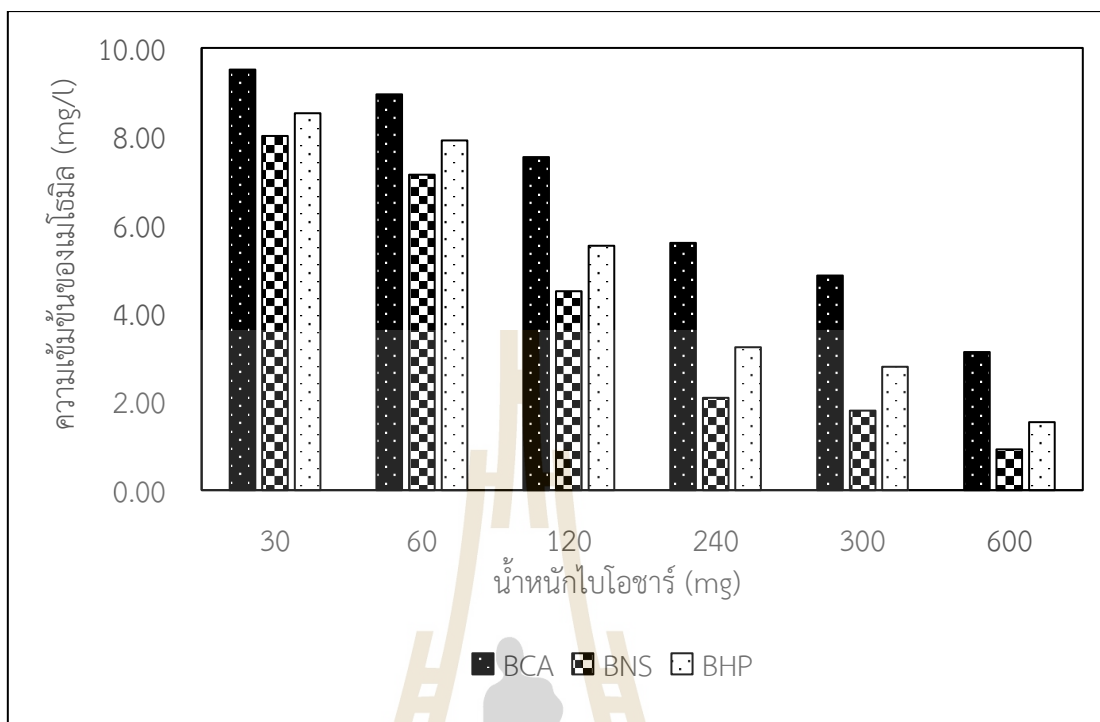


รูปที่ 4.14 ผลของค่าความเป็นกรดต่อการดูดซับเมโรมิลด้วยไบโอชาร์

4.2.4 ผลของน้ำหนักวัสดุดูดซับต่อประสิทธิภาพการดูดซับเมโรมิล

ผลการศึกษาค่าน้ำหนักวัสดุดูดซับต่อประสิทธิภาพการดูดซับเมโรมิลของ 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 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มน้ำหนักของวัสดุดูดซับส่งผลให้ความเข้มข้นของเมโรมิลในสารละลายลดลง ซึ่งสะท้อนถึงปริมาณการดูดซับที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากน้ำหนักวัสดุที่มากขึ้นหมายถึงพื้นที่ผิวสัมผัสที่มากขึ้น ซึ่งช่วยให้ไบโอชาร์สามารถดูดซับเมโรมิลได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการดูดซับในตัวอย่างต่าง ๆ มีความแตกต่างกันตามชนิดของไบโอชาร์ โดย BNS และ BHP แสดงผลการดูดซับได้ดีในทุกช่วงน้ำหนัก ซึ่งสะท้อนถึงการดัดแปลงคุณสมบัติทั้งกายภาพ และสมบัติทางเคมีของพื้นผิวไบโอชาร์ จากการดัดแปลงด้วยกรดฟอสฟอริก ขณะที่ตัวอย่าง BCA แสดงผลการดูดซับต่ำกว่าไบโอชาร์อีกสองชนิดในทุกช่วงน้ำหนัก ซึ่งอาจเกิดจากการมีพื้นผิวสัมผัสและหมู่ฟังก์ชันที่น้อยกว่าไบโอชาร์ที่ดัดแปลงแล้ว การทดลองนี้ยังแสดงให้เห็นว่า การดัดแปลงด้วยโซเดียมซิลิเกตและการดัดแปลงด้วยกรดฟอสฟอริก มีผลต่อสมบัติการดูดซับของไบโอชาร์ เนื่องจากการดัดแปลงช่วยเพิ่มการเกิดรูพรุน และเพิ่มหมู่ฟังก์ชันของไบโอชาร์ ซึ่งช่วยเสริมการจับยึดของเมโรมิล



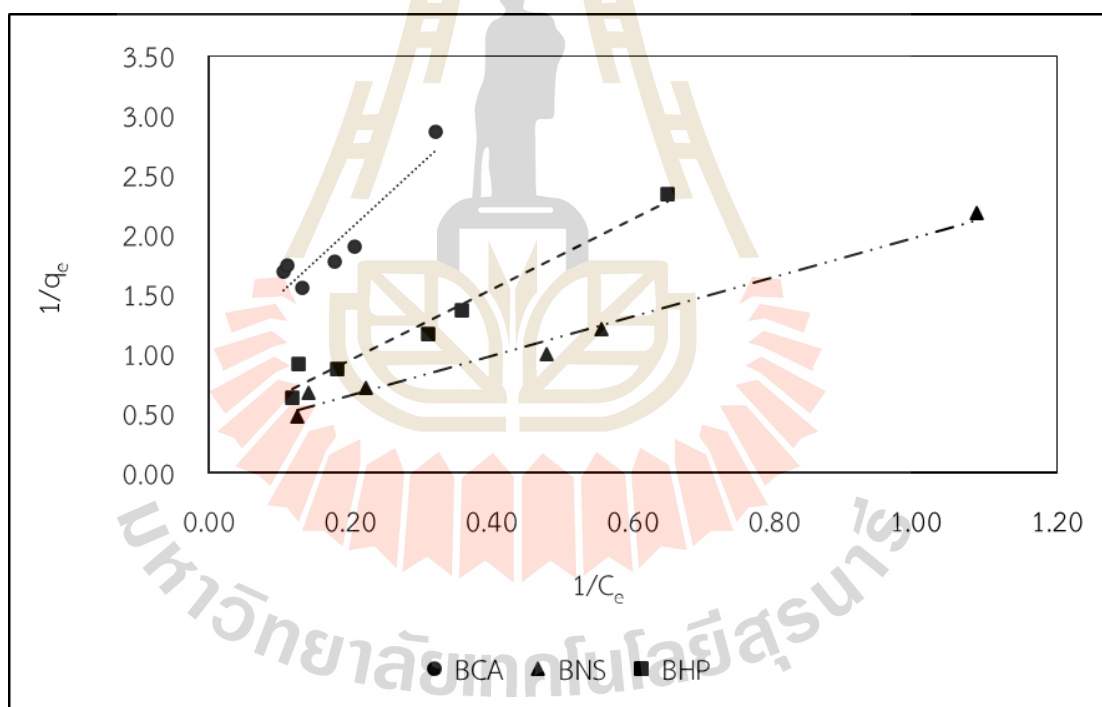
รูปที่ 4.15 ผลของค่าน้ำหนักวัสดุดูดซับการดูดซับเมโรซิล

4.2.5 ผลการศึกษาไอโซเทิร์มของการดูดซับสำหรับการดูดซับเมโรซิลของไบโอชาร์

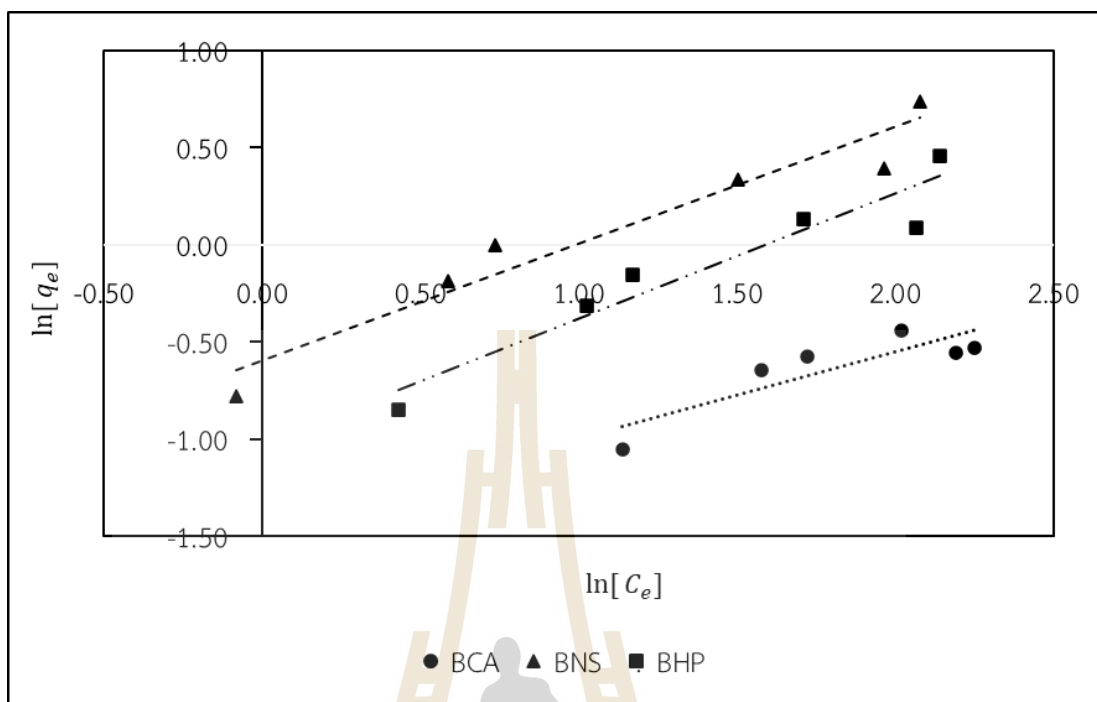
ผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับที่มีต่อการดูดซับเมโรซิลของ BCA BNS และ BHP การศึกษานี้จะใช้วิธีการดังหัวข้อ 4.2.4 ผลการทดลองแสดงให้เห็นไอโซเทิร์มที่เหมาะสม โดยสมการไอโซเทิร์มการดูดซับที่นำมาใช้คือ สมการของ Langmuir นำจากผลการศึกษาวิเคราะห์ โดยเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\frac{1}{q_e}$ กับค่า $\frac{1}{C_e}$ 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

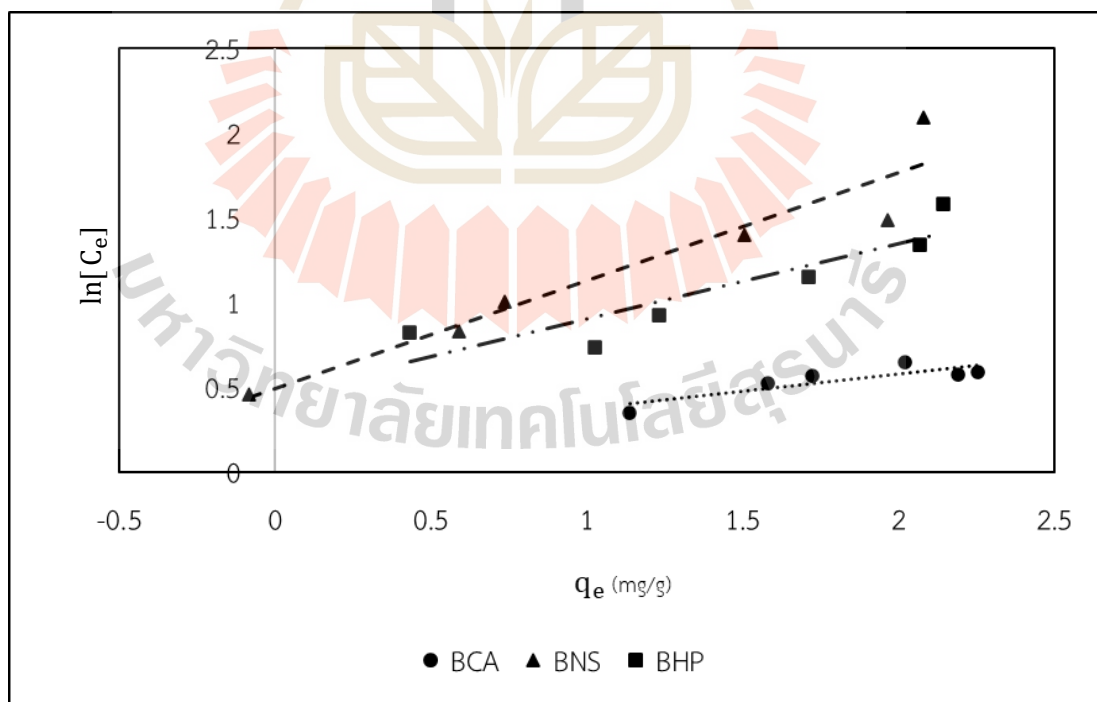
ชนิด Biochar	Langmuir constant			Freundlich constants			Temkin constants		
	q_{\max} (mg/g)	K_L (L/mg)	R^2	K_f (mg/g)	n	R^2	A (L/g)	B (J/mol)	R^2
BCA	1.03	0.176	0.8635	0.238	2.27	0.7483	2.193	0.208	0.752
BNS	3.12	0.192	0.9813	0.551	0.635	0.9377	2.149	0.638	0.910
BHP	2.8	0.121	0.9693	0.359	1.55	0.9136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



รูปที่ 4.16 ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบ Langmuir ของการดูดซับเมโรนิตของไบโอชาร์ทั้งสามชนิด BCA BNS BHP



รูปที่ 4.17 ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบ Freundlich ของการดูดซับเมโรมิลของไปโอซาร์ ทั้งสามชนิด BCA BNS BHP



รูปที่ 4.18 ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบ Temkin ของการดูดซับเมโรมิลของไปโอซาร์ ทั้งสามชนิด BCA BNS BHP

จากผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.7 พบว่าไอโซเทอร์ม Langmuir และ Freundlich ต่างมีการอธิบายพฤติกรรมของการดูดซับเมโรมิลบนไบโอชาร์ 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

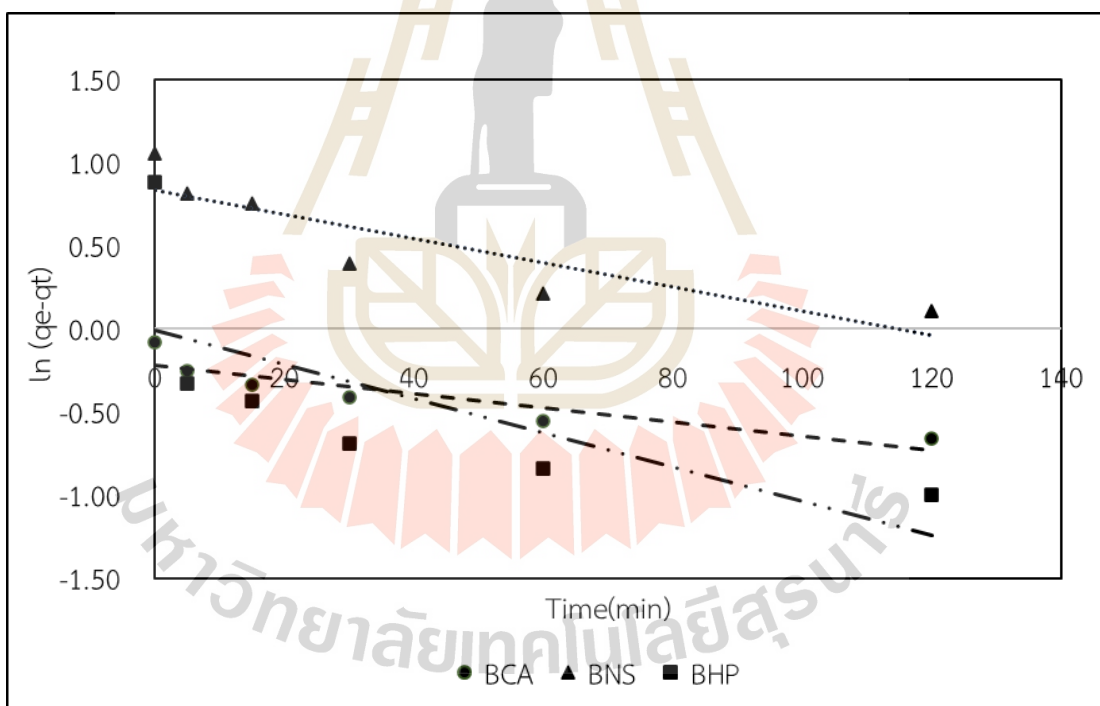
4.2.6 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์สำหรับการดูดซับเมโรมิลของไบโอชาร์

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

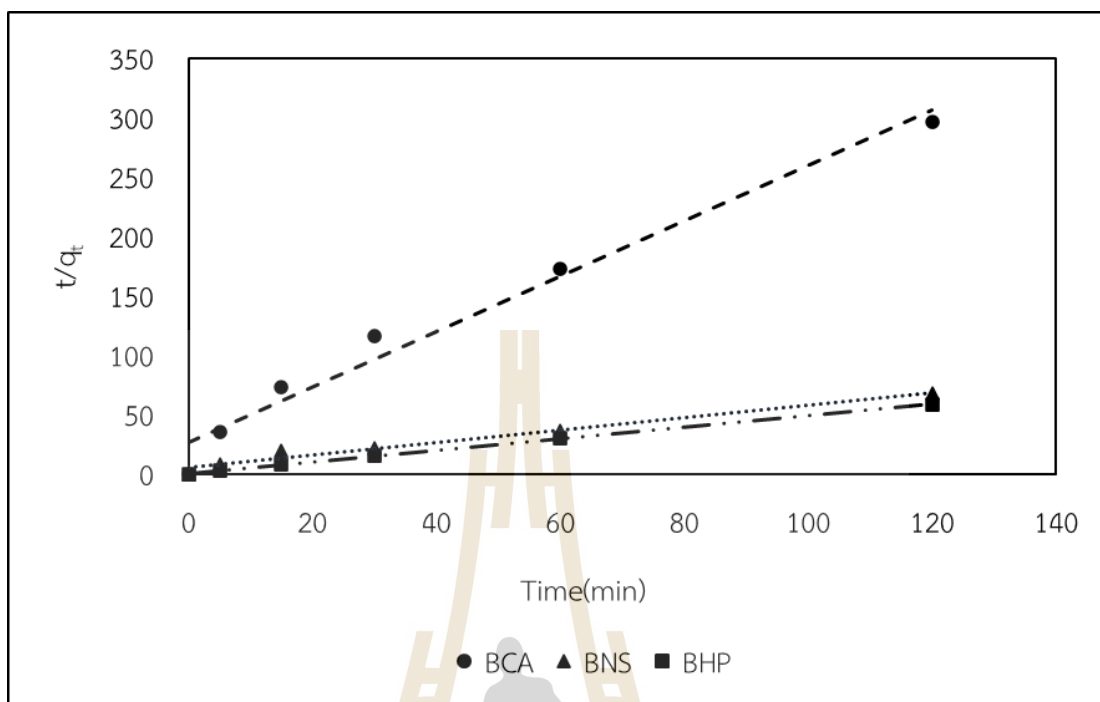
อย่างมีประสิทธิภาพ โดยภาพรวมสรุปได้ว่าไบโอชาร์ทั้งสามชนิดเหมาะสมกับ จลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียม ซึ่งแสดงถึงกระบวนการดูดซับที่ถูกควบคุมด้วยปฏิกิริยาเคมี

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

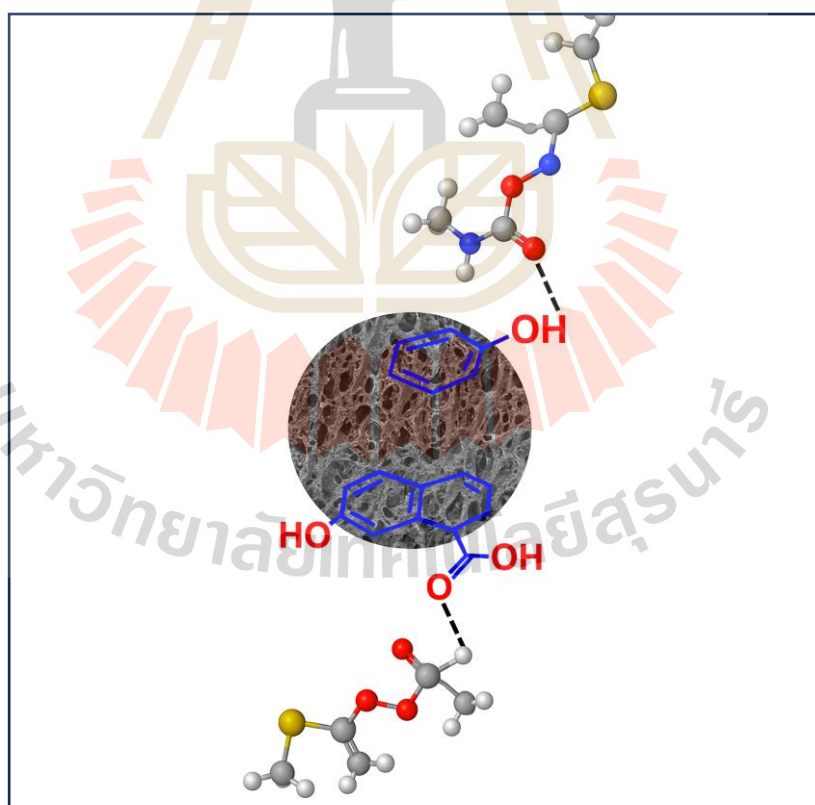
ตัวของรูปทรง ความสามารถในการเข้าถึงของโมเลกุลเมโรมิลในด้านอื่น และกลไกทางเคมี (Chen et al., 2018)

4.2.7.2 กลไกทางเคมี

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

1) พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bonding)

ผลการวิเคราะห์สเปกตรัม FTIR แสดงให้เห็นว่าไบโอชาร์ทั้งสามชนิดมีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถจับกับกลุ่มตัวของเมโรมิลผ่านพันธะไฮโดรเจน 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 Srikhaow et al., (2022)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการศึกษาคูณลักษณะทางกายภาพ และทางเคมีของไบโอชาร์จากเห้ง้ามันสำปะหลัง (BCA) ไบโอชาร์ที่ดัดแปลงด้วยโซเดียมซิลิเกต (BNS) และไบโอชาร์ที่ดัดแปลงด้วยกรดฟอสฟอริก (BHP) จากนั้นนำไปดูดซับสารละลายเมโรมิลในการทดลองแบบแบตช์ จากการศึกษาข้างต้นสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 สรุปคุณสมบัติของไบโอชาร์จากเห้ง้ามันสำปะหลัง

จากการสังเคราะห์ไบโอชาร์จากเห้ง้ามันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2.5 ชั่วโมง พบว่าเป็นเงื่อนไขที่ให้ไบโอชาร์คุณภาพดีที่สุดจากตัวอย่างทั้งหมด โดยมีปริมาณคาร์บอนเท่ากับ 78.15 เปอร์เซ็นต์ และมีอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนต่ำที่สุดเท่ากับ 0.0261 ซึ่งเป็นค่าที่บ่งชี้ถึงระดับความเสถียรทางเคมีของไบโอชาร์และแสดงถึงโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นวงอะโรมาติกมากขึ้น อันเป็นลักษณะของไบโอชาร์คุณภาพสูงตามเกณฑ์ของ European Biochar Certificate (EBC) ทั้งนี้ลักษณะโครงสร้างรูพรุนจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET และ SEM พบว่าไบโอชาร์ทั้งสามชนิดจัดอยู่ในกลุ่มรูพรุนขนาดกลาง (Mesopores) ตามมาตรฐานของ International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) ซึ่งเหมาะสมสำหรับการดูดซับโมเลกุลของสารเคมีปราบศัตรูพืช โดย BNS มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงที่สุดเท่ากับ 5.45 ตารางเมตรต่อกรัม BCA มีพื้นที่ผิวจำเพาะรองลงมาเท่ากับ 2.27 ตารางเมตรต่อกรัม และ BHP มีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยที่สุดเท่ากับ 1.92 ตารางเมตรต่อกรัม แสดงให้เห็นว่าขั้นตอนในการดัดแปลงด้วยโซเดียมซิลิเกตช่วยเพิ่มโครงสร้างที่มีรูพรุนละเอียดและเพิ่มพื้นที่ผิว ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสารมลพิษ แต่เมื่อพิจารณาจากสเปกตรัม FTIR พบว่าการดัดแปลงไบโอชาร์ทั้งสองชนิดส่งผลให้เกิดการเพิ่มของหมู่ฟังก์ชันจำเพาะบนพื้นผิว ได้แก่ หมู่ไฮดรอกซิล ($-OH$) หมู่ฟอสเฟต ($P=O$, $P-OH$) จากกรดฟอสฟอริก และหมู่ซิลิกา ($Si-O$, $Si-O-Si$) จากโซเดียมซิลิเกต ซึ่งหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้มีบทบาทสำคัญต่อกลไกการดูดซับเชิงเคมี เช่น การเกิดพันธะไฮโดรเจน และแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตกับเมโรมิล นอกจากนี้การศึกษาค่าประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ ซึ่งแสดงถึงค่าความเป็นกลางของประจุบนพื้นผิวของไบโอชาร์ พบว่า BNS มีค่าประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ ต่ำที่สุดคือ 2.60 หมายความว่าในสภาวะที่ค่าพีเอชสูงกว่านี้ ผิวของไบโอชาร์จะมีประจุลบ ส่งผลให้เหมาะสมต่อการดูดซับเมโรมิลที่มีขั้วหรือสารที่มีประจุบวกได้ดีขึ้น สำหรับ BHP มีค่าพีเอชที่ประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ เท่ากับ 5.26 ซึ่งยังอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าสถิตระหว่างสารเมโรมิลกับหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิววัสดุ ทั้งนี้ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีทั้งหมดบ่งชี้ว่า การดัดแปลงไบโอชาร์ด้วยสารเคมีสามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและคุณสมบัติบนพื้นผิวได้ และช่วยเพิ่มศักยภาพในการดูดซับสารเคมีปราบศัตรูพืชได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

5.1.2 สรุปผลการศึกษาผลการบำบัดเมโรมิล

จากการศึกษาการดูดซับเมโรมิลของ BCA BNS และ BHP ภายใต้สภาวะการทดลองที่แตกต่างกัน พบว่ามีปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับอย่างชัดเจน โดยเฉพาะในด้านของระยะเวลา ความเร็วรอบ ค่าพีเอช และน้ำหนักของตัวดูดซับ สำหรับผลของเวลา พบว่ากระบวนการดูดซับเข้าสู่ภาวะสมดุลภายใน 1440 นาที โดย BHP แสดงประสิทธิภาพสูงสุดในการลดความเข้มข้นของเมโรมิล โดยมีค่าอัตราส่วน C/C_0 ต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอื่น ซึ่งแสดงถึงการดูดซับที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นตามลำดับเวลา ส่วนในด้านของความเร็วรอบที่ใช้ในการเขย่าแบบเคลื่อนที่เชิงเส้น พบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วรอบจาก 50 100 จนถึง 200 รอบต่อนาที จะช่วยเพิ่มอัตราการดูดซับได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในไบโอชาร์ที่มีการดัดแปลง BNS และ BHP ที่มีโครงสร้างรูพรุนและหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวมากเพียงพอ ซึ่งการเพิ่มความเร็วรอบจะช่วยลดชั้น Boundary Layer ที่ขวางการแพร่ของเมโรมิลเข้าสู่พื้นผิวของตัวดูดซับ และส่งเสริมการเข้าสู่รูพรุนได้ดีขึ้น สำหรับการศึกษาผลของค่าความเป็นกรดต่างพบว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการดูดซับเมโรมิลคือค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 3 ซึ่งเป็นช่วงที่โมเลกุลของเมโรมิลที่อยู่ในกลุ่มคาร์บาเมตโมเลกุลมีประจุบวก ส่งผลให้สามารถเข้าไปจับกับหมู่ฟังก์ชันที่เป็นขั้วของไบโอชาร์ได้ง่าย โดยเฉพาะ BNS ที่มีค่าประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ ต่ำที่สุดและพื้นผิวแสดงประจุลบในช่วงค่าความเป็นกรดต่างดังกล่าว ทำให้สามารถดูดซับเมโรมิลที่มีคุณสมบัติเป็นโมเลกุลที่มีขั้วได้ดียิ่งขึ้น รองลงมาคือ BHP ซึ่งแสดงการตอบสนองที่ดีเช่นกัน ส่วนในค่าความเป็นกรดต่างสูงเท่ากับ 11 พบว่าเป็นการสลายตัวของเมโรมิลในสภาวะต่าง สุดท้ายในการศึกษาผลของน้ำหนักตัวดูดซับ พบว่าการเพิ่มน้ำหนักของไบโอชาร์ตั้งแต่ 30 ไปจนถึง 600 มิลลิกรัม โดยที่ 600 มิลลิกรัม ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้นสูงสุด BNS BHP BCA สามารถลดค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของเมโรมิลจาก 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ไปเป็น 0.92 1.54 3.12 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับซึ่งแสดงถึงการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสและจำนวน active sites ที่มีอยู่บนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันจำเพาะ ช่วยส่งเสริมการดูดซับเมโรมิลได้ดียิ่งขึ้น ทั้งนี้ จากผลทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่า การดัดแปลงไบโอชาร์ด้วยโซเดียมซัลไฟด์ และกรดฟอสฟอริกสามารถเพิ่มศักยภาพในการดูดซับเมโรมิลได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อเทียบกับไบโอชาร์จากเหง้ามันสำปะหลังที่ไม่ได้รับการดัดแปลง

5.1.3 ไอโซเทิร์มและจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

จากการศึกษาพฤติกรรมของการดูดซับของเมโรมิลบน BCA BNS และ BHP ได้แกพบว่าแบบจำลองไอโซเทิร์มของ Langmuir สามารถอธิบายกระบวนการดูดซับได้ดีที่สุด โดยให้ค่าความสัมพันธ์ R^2 สูงในทุกกรณี ได้แก่ BNS เท่ากับ 0.9813 BHP เท่ากับ 0.9693 และ BCA เท่ากับ 0.8635 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การดูดซับของเมโรมิลบนพื้นผิวของไบโอชาร์มีลักษณะเป็นแบบชั้นเดียวบนพื้นผิวที่เป็นเนื้อเดียวกัน (Monolayer adsorption) ในส่วนของจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ ผลการทดลองสอดคล้องกับแบบจำลองลำดับสองเทียมน มากกว่าแบบจำลองลำดับหนึ่งเทียมโดยให้ค่า R^2 สูงถึง 0.9995 สำหรับ BCA และ BHP และ 0.9743 สำหรับ BNS แสดงให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับควบคุมโดยการเกิดปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิวของไบโอชาร์ ค่าอัตราเร็วของการดูดซับ (K_2) ในแบบจำลองลำดับสองเทียมน พบว่า BHP มีค่า K_2 สูงที่สุดคือ 0.3263 กรัมต่อมิลลิกรัมต่อนาทีรองลงมาคือ BNS เท่ากับ 0.0320 กรัมต่อมิลลิกรัมต่อนาที และ BCA เท่ากับ 0.0021 กรัมต่อมิลลิกรัมต่อนาที ซึ่งแสดง

ให้เห็นว่าไบโอชาร์ที่ผ่านการดัดแปลงด้วยกรดฟอสฟอริกมีความเร็วในการดูดซับสูงสุด และเหมาะสมต่อการกำจัดเมธิลออกจากสารละลาย ทั้งนี้ค่าการดูดซับที่สมดุล (q_e) ของ BHP อยู่ที่ 2.055 มิลลิกรัมต่อกรัมซึ่งสูงกว่าทุกชนิด สอดคล้องกับผลจากแบบจำลองไอโซเทิร์ม สรุปได้ว่าไบโอชาร์ BNS และ BHP มีประสิทธิภาพในการดูดซับเมธิลที่สูงกว่า BCA ซึ่งแสดงถึงศักยภาพของการดัดแปลงด้วยโซเดียมซิลิเกต และกรดฟอสฟอริกในการเพิ่มสมบัติของวัสดุดูดซับเพื่อใช้ในกระบวนการบำบัดเมธิลในน้ำ

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรศึกษาขยายผลการวิจัยไปยังสารกำจัดศัตรูพืชชนิดอื่นในกลุ่มคาร์บาเมท เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับของไบโอชาร์อย่างครอบคลุมยิ่งขึ้น และประเมินศักยภาพการประยุกต์ใช้ในระบบบำบัดน้ำจริง

5.2.2 ควรศึกษาเพิ่มเติมในระบบไหลต่อเนื่อง (Continuous Flow System) เช่น คอลัมน์ดูดซับ เพื่อประเมินประสิทธิภาพของไบโอชาร์ภายใต้สภาวะที่ใกล้เคียงกับการใช้งานจริงมากขึ้น ซึ่งจะช่วยให้พัฒนาไปสู่การใช้งานเชิงอุตสาหกรรม

5.2.3 ควรศึกษาความสามารถในการนำวัสดุดูดซับกลับมาใช้ใหม่ (Regeneration) ของไบโอชาร์ที่ดัดแปลงแล้ว เพื่อประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และความยั่งยืนในการใช้งานในระยะยาว

5.2.4 ควรศึกษาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของไบโอชาร์หลังการใช้งาน โดยเฉพาะในด้านการจัดการของเสีย การย่อยสลาย หรือการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่น ๆ เช่น ปรับปรุงคุณภาพดิน เพื่อให้การประยุกต์ใช้ไบโอชาร์เป็นไปอย่างปลอดภัยและยั่งยืน

5.2.5 ควรมีการเก็บข้อมูลการใช้สารเคมี หรือการใช้พลังงานเพื่อนำมาประเมินความคุ้มค่าเพิ่มเติม

รายการอ้างอิง

- จาทรงศ์ ผลประเสริฐ. (2565) .การวิเคราะห์หาสารเคมีกำจัดแมลงในกลุ่มคาร์บาเมตที่ตกค้างในตัวอย่างทางการเกษตรด้วยเทคนิค โครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี มหาวิทยาลัยศิลปากร).
- ชัยยศ ตั้งสฤตย์กุลชัย (2554). กระบวนการดูดซับ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.
- พินิจภณ ปิตุยะ. (2557). เอกสารองค์ความรู้เรื่อง ถ่านชีวภาพ. ศูนย์ศึกษาการพัฒนาห้วยทราย อันเนื่องมาจากพระราชดำริ. นราธิวาส.
- ภูสิต ปุกมณี. (2558). การศึกษาปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกส์สำหรับการสลายตัวของสารกำจัดแมลงเมทโธมิลจากแหล่งน้ำธรรมชาติ โดยผงไททานเนียมไดออกไซด์และผงบิสมัทธวานาเดต ที่เตรียมด้วยวิธีโซลโวลเทอร์มอลอุณหภูมิต่ำ.
- อนัญญา จีระโร, สุธาทิพย์ สิ้นยัง, พวงรัตน์ ขจิตวิษยานุกูล, & กิตติพงศ์ คุณจริยกุล. (2024). จลนศาสตร์และไอโซเทอร์มการดูดซับอะทราซีนโดยไบโอชาร์ไม้ไผ่. วารสารวิชาการพระจอมเกล้า พระนครเหนือ, 34(1), ID-241.
- อนุสรรา แก้วการ. (2562) .การสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรด้วยสารสกัดใบยูคาลิปตัส และคลื่นอัลตราโซนิคสำหรับการบำบัดสารไกลโฟเซตในดิน โดยใช้ปฏิกิริยาเสมือนเฟนตัน (วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี).
- Akl, M. A., Youssef, A. F. M., Hassan, A. H., & Maher, H. (2016). Synthesis, characterization and evaluation of peanut shells-derived activated carbons for removal of methomyl from aqueous solutions. *J Environ Anal Toxicol*, 6(352), 2161-0525.)
- Alsherbeny, S., Jamil, T. S., El-Sawi, S. A., & Eissa, F. I. (2022). Low-cost corn cob biochar for pesticides removal from water. *Egyptian Journal of Chemistry*, 65(2), 639-650.
- Atkins, P., & de Paula, J. (2010). *Materials 2: solids. Physical Chemistry*; 9th Ed. WH Freeman and Company: New York, NY, 695-742.
- Aup-Ngoen, K., & Noipitak, M. (2020). Effect of carbon-rich biochar on mechanical properties of PLA-biochar composites. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 15, 1002
- Chang, C. F., Chang, C. Y., Hsu, K. E., Lee, S. C., & Höll, W. (2008). Adsorptive removal of the pesticide methomyl using hypercrosslinked polymers. *Journal of hazardous materials*, 155(1-2), 295-304.

- Chen, T., Luo, L., Deng, S., Shi, G., Zhang, S., Zhang, Y., & Wei, L. (2018). Sorption of tetracycline on H₃PO₄ modified biochar derived from rice straw and swine manure. *Bioresource technology*, 267, 431-437.
- Chen, T., Luo, L., Deng, S., Shi, G., Zhang, S., Zhang, Y., & Wei, L. (2018). Sorption of tetracycline on H₃PO₄ modified biochar derived from rice straw and swine manure. *Bioresource technology*, 267, 431-437.
- Chen, X., Xia, X., Wang, X., Qiao, J., & Chen, H. (2011). A comparative study on sorption of perfluorooctane sulfonate (PFOS) by chars, ash and carbon nanotubes. *Chemosphere*, 83(10), 1313-1319.
- Cheng, F., & Li, X. (2018). Preparation and application of biochar-based catalysts for biofuel production. *Catalysts*, 8(9), 346.
- Cid, A. P., del Mundo, F. R., & Espino, M. P. B. (2006). A modified analytical procedure for the determination of carbaryl, carbofuran and methomyl residues in agricultural soil and river water samples from La Trinidad, Benguet and Aurora, Isabela, Philippines. *Philippine Agricultural Scientist*, 89(1), 71.
- Cosgrove, S., Jefferson, B., & Jarvis, P. (2019). Pesticide removal from drinking water sources by adsorption: a review. *Environmental Technology Reviews*, 8(1), 1-24.
- de Carvalho Eufrásio Pinto, M., David da Silva, D., Amorim Gomes, A. L., Menezes dos Santos, R. M., Alves de Couto, R. A., Ferreira de Novais, R., . . . Pinto, F. G. (2019). Biochar from carrot residues chemically modified with magnesium for removing phosphorus from aqueous solution. *Journal of Cleaner Production*, 222, 36-46. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.012>
- Dong, X., Chu, Y., Tong, Z., Sun, M., Meng, D., Yi, X., ... & Duan, J. (2024). Mechanisms of adsorption and functionalization of biochar for pesticides: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 272, 116019.
- Ecobichon, D. J. (2001). Pesticide use in developing countries. *Toxicology*, 160(1-3), 27-33.
- Edeh, I. G., & Mašek, O. (2022). The role of biochar particle size and hydrophobicity in improving soil hydraulic properties. *European Journal of Soil Science*, 73(1), e13138.
- Farré, M., Fernandez, J., Paez, M., Granada, L., Barba, L., Gutierrez, H., ... & Barceló, D. (2002). Analysis and toxicity of methomyl and ametryn after biodegradation. *Analytical and bioanalytical chemistry*, 373, 704-709.
- Fathy, N. A., Attia, A. A., & Hegazi, B. (2016). Nanostructured activated carbon xerogels for removal of methomyl pesticide. *Desalination and water treatment*, 57(21), 9957-9970.


- Freundlich, H. M. F. (1906). Over the adsorption in solution. *Journal of Physical Chemistry*, 57, 385-471.
- Guo, Y., & Wang, Q. (2023). Exploring the adsorption potential of Na₂SiO₃-activated porous carbon materials from waste bamboo biomass for ciprofloxacin rapid removal in wastewater. *Environmental Technology & Innovation*, 32, 103318.
- Gámiz, B., Velarde, P., Spokas, K. A., Hermosín, M. C., & Cox, L. (2017). Biochar soil additions affect herbicide fate: importance of application timing and feedstock species. *Journal of agricultural and food chemistry*, 65(15), 3109-3117.
- Geçca, M., Khalil, A. M., Tang, M., Bhakta, A. K., Snoussi, Y., Nowicki, P., & Chehimi, M. M. (2023). Surface treatment of biochar—methods, surface analysis and potential applications: a comprehensive review. *Surfaces*, 6(2), 179-213.
- Hill, A. V. (1910). The possible effects of the aggregation of the molecules of hemoglobin on its dissociation curves. *J. physiol.*, 40, iv-vii.
- Ho, Y. S., & McKay, G. (1999). Pseudo-second order model for sorption processes. *Process Biochemistry*, 34(5), 451-465. doi:10.1016/S0032-9592(98)00112-5.
- Inyang, M., & Dickenson, E. (2015). The potential role of biochar in the removal of organic and microbial contaminants from potable and reuse water: A review. *Chemosphere*, 134, 232-240.
- Janu, R., Mrlik, V., Ribitsch, D., Hofman, J., Sedláček, P., Bielská, L., & Soja, G. (2021). Biochar surface functional groups as affected by biomass feedstock, biochar composition and pyrolysis temperature. *Carbon Resources Conversion*, 4, 36-46.
- Khater, E. S., Bahnasawy, A., Hamouda, R., Sabahy, A., Abbas, W., & Morsy, O. M. (2024). Biochar production under different pyrolysis temperatures with different types of agricultural wastes. *Scientific Reports*, 14(1), 2625.
- Khorram, M. S., Zhang, Q., Lin, D., Zheng, Y., Fang, H., & Yu, Y. (2016). Biochar: a review of its impact on pesticide behavior in soil environments and its potential applications. *Journal of environmental sciences*, 44, 269-279.
- Kroeksakul, P., Ngamniyom, A., Silprasit, K., Sutthisaksopon, P., Sriyapai, T., Phowan, N., & Singhaboot, P. (2023). Evaluation of Pesticide and Heavy Metal Contamination on Soil Properties and Microbiota in Thailand's Mountainous Region. *Journal of Ecological Engineering*, 24(7).
- Lagergren, S. (1898). About the theory of so-called adsorption of soluble substances. *Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens Handlingar*, 24(4), 1-39.
- Langmuir, I. (1918). The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica, and platinum. *Journal of the American Chemical Society*, 40(9), 1361-1403.

- Lehmann, J., & Joseph, S. (Eds.). (2009). *Biochar for environmental management: Science and technology*. Earthscan.
- Mandal, A., Singh, N., & Purakayastha, T. J. (2017). Characterization of pesticide sorption behaviour of slow pyrolysis biochars as low cost adsorbent for atrazine and imidacloprid removal. *Science of the Total Environment*, 577, 376-385.
- Mayakaduwa, S. S., Vithanage, M., Karunarathna, A., Mohan, D., & Ok, Y. S. (2016). Interface interactions between insecticide carbofuran and tea waste biochars produced at different pyrolysis temperatures. *Chemical Speciation & Bioavailability*, 28(1-4), 110-118.
- Mimmo, T., Panzacchi, P., Baratieri, M., Davies, C. A., & Tonon, G. (2014). Effect of pyrolysis temperature on miscanthus (*Miscanthus x giganteus*) biochar physical, chemical and functional properties. *Biomass and Bioenergy*, 62, 149-157.
- Mohamed Noor, N., Shariff, A., & Abdullah, N. (2012). Slow pyrolysis of cassava wastes for biochar production and characterization. *Iranica Journal of Energy & Environment*, 3(5).
- Mortensen, S. R., & Serex, T. L. (2014). Methomyl. *Encyclopedia of toxicology*, 242-245.
- Mukherjee, A., Zimmerman, A., Harris, W., 2011. Surface chemistry variations among series of laboratory-produced biochars. *Geoderma* 163 (3-4), 247-255.
- Mukherjee, A., Patra, B. R., Podder, J., & Dalai, A. K. (2022). Synthesis of biochar from lignocellulosic biomass for diverse industrial applications and energy harvesting: effects of pyrolysis conditions on the physicochemical properties of biochar. *Frontiers in Materials*, 9, 870184.
- Peng, H., Gao, P., Chu, G., Pan, B., Peng, J., & Xing, B. (2017). Enhanced adsorption of Cu (II) and Cd (II) by phosphoric acid-modified biochars. *Environmental Pollution*, 229, 846-853.
- Priyadarshini, B., Rath, P. P., Behera, S. S., Panda, S. R., Sahoo, T. R., & Parhi, P. K. (2018, February). Kinetics, Thermodynamics and Isotherm studies on Adsorption of Eriochrome Black-T from aqueous solution using Rutile TiO₂. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 310, p. 012051). IOP Publishing.
- Salehi, E., Askari, M., Velashjerdi, M., & Arab, B. (2020). Phosphoric acid-treated spent tea residue biochar for wastewater decoloring: batch adsorption study and process intensification using multivariate data-based optimization. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 158, 108170.

- Sari, L., Shofiyani, A., & Sapar, A. (2024). Synthesis and Characterization of Silica-Biochar Composite as Rhodamine B Dye Adsorbent. *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*, 27(6), 284-292.
- Shariff, A., Noor, N. M., Lau, A., & Ali, M. A. M. (2016). A comparative study on biochar from slow pyrolysis of corn cob and cassava wastes. *International Journal of Biotechnology and Bioengineering*, 10(12), 767-771.
- Srikhaow, A., Chaengsawang, W., Kiatsiroat, T., Kajitvichyanukul, P., & Smith, S. M. (2022). Adsorption kinetics of imidacloprid, acetamiprid and methomyl pesticides in aqueous solution onto eucalyptus woodchip derived biochar. *Minerals*, 12(5), 528.
- Sun, J., He, F., Pan, Y., & Zhang, Z. (2017). Effects of pyrolysis temperature and residence time on physicochemical properties of different biochar types. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Soil & Plant Science*, 67(1), 12-22.
- Suo, F., You, X., Ma, Y., & Li, Y. (2019). Rapid removal of triazine pesticides by P doped biochar and the adsorption mechanism. *Chemosphere*, 235, 918-925.
- Taha, S. M., Amer, M. E., Elmarsafy, A. E., & Elkady, M. Y. (2014). Adsorption of 15 different pesticides on untreated and phosphoric acid treated biochar and charcoal from water. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2(4), 2013-2025.
- Temkin, M. I., & Pyzhev, V. (1940). Kinetics of ammonia synthesis on promoted iron catalysts. *Acta Physicochimica URSS*, 12, 327-356.
- Tippayawong, N., Rerkkriangkrai, P., Aggarangsi, P., & Pattiya, A. (2017). Biochar production from cassava rhizome in a semi-continuous carbonization system. *Energy Procedia*, 141, 109-113.
- Tomczyk, A., Sokołowska, Z., & Boguta, P. (2020). Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 19(1), 191-215.
- Tong, Y., McNamara, P. J., & Mayer, B. K. (2019). Adsorption of organic micropollutants onto biochar: a review of relevant kinetics, mechanisms and equilibrium. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 5(5), 821-838.
- Varjani, S., Kumar, G., & Rene, E. R. (2019). Developments in biochar application for pesticide remediation: current knowledge and future research directions. *Journal of environmental management*, 232, 505-513.
- Wijitkosum, S., & Jiwonok, P. (2019). Elemental composition of biochar obtained from agricultural waste for soil amendment and carbon sequestration. *Applied sciences*, 9(19), 3980.

- Wijitkosum, S. (2022). Biochar derived from agricultural wastes and wood residues for sustainable agricultural and environmental applications. *International Soil and Water Conservation Research*, 10(2), 335-341.
- Yang, G. P., Zhao, Y. H., Lu, X. L., & Gao, X. C. (2005). Adsorption of methomyl on marine sediments. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 264(1-3), 179-186.
- Yokoyama, J. T., Cazetta, A. L., Bedin, K. C., Spessato, L., Fonseca, J. M., Carraro, P. S., & Almeida, V. C. (2019). Stevia residue as new precursor of CO₂-activated carbon: Optimization of preparation condition and adsorption study of triclosan. *Ecotoxicology and environmental safety*, 172, 403-410.
- Zhang, C., Liu, L., Zhao, M., Rong, H., & Xu, Y. (2018). The environmental characteristics and applications of biochar. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 21525-21534.
- Zhang, P., Sun, H., Yu, L., Sun, T., 2012. Adsorption and catalytic hydrolysis of carbaryl and atrazine on pig manure-derived biochars: impact of structural properties of biochars. *J. Hazard. Mater.* 244 (245), 217–224.
- Zhao, X., Ouyang, W., Hao, F., Lin, C., Wang, F., Han, S., & Geng, X. (2013). Properties comparison of biochars from corn straw with different pretreatment and sorption behaviour of atrazine. *Bioresource technology*, 147, 338-344





ภาคผนวก ก
ผลการดูดซับสารเมโรมิลของไบโอชาร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก. 1 ผลของระยะเวลาสัมผัสที่มีต่อการดูดซับสารเมไธมิล

ระยะเวลาสัมผัส (นาที)	C/C0		
	BCA	BNS	BHP
0	0.00	0.00	0.00
5	0.14	0.61	1.69
15	0.20	0.73	1.76
30	0.26	1.39	1.91
60	0.35	1.64	1.98
120	0.41	1.76	2.04
180	0.53	1.84	2.22
240	0.63	1.92	2.30
300	0.67	2.06	2.39
360	0.72	2.40	2.40
1440	0.92	2.87	2.41

ตารางที่ ก. 2 ผลของค่าความเร็วรอบที่มีต่อการดูดซับสารเมไธมิลที่ความเร็วรอบ 50 RPM

RPM 50 Time(min)	C/C0		
	BCA	BNS	BHP
0	1	1	1
5	1.00	0.99	0.98
15	1.00	0.97	0.97
30	0.97	0.97	0.96
60	0.97	0.95	0.96
120	0.96	0.95	0.95
180	0.96	0.95	0.94
240	0.96	0.95	0.94
300	0.96	0.94	0.94
360	0.95	0.93	0.94
1440	0.95	0.91	0.93

ตารางที่ ก. 3 ผลของค่าความเร็รรอบที่มีต่อการดูดซับสารเมไธมิลที่ความเร็รรอบ 100 RPM

RPM 100	C/C0		
Time(min)	BCA	BNS	BHP
0	1	1	1
5	0.99	0.97	0.96
15	0.98	0.96	0.96
30	0.97	0.95	0.95
60	0.96	0.95	0.95
120	0.96	0.94	0.93
180	0.96	0.93	0.92
240	0.95	0.92	0.91
300	0.95	0.92	0.91
360	0.93	0.91	0.90
1440	0.93	0.90	0.90

ตารางที่ ก. 4 ผลของค่าความเร็รรอบที่มีต่อการดูดซับสารเมไธมิลที่ความเร็รรอบ 200 RPM

RPM 200	C/C0		
Time(min)	BCA	BNS	BHP
0	1	1	1
5	0.99	0.94	0.83
15	0.98	0.93	0.82
30	0.97	0.86	0.81
60	0.96	0.83	0.80
120	0.96	0.82	0.79
180	0.95	0.81	0.78
240	0.94	0.81	0.77
300	0.93	0.79	0.76
360	0.93	0.76	0.76
1440	0.91	0.71	0.76

ตารางที่ ก. 5 ผลของค่าพีเอชต่อการดูดซับสารเมโรไมด์ด้วยไบโอชาร์

พีเอช	C/C0		
	BCA	BNS	BHP
3	0.86	0.75	0.83
5	0.89	0.87	0.88
7	0.87	0.88	0.9
9	0.85	0.93	0.93
11	0.71	0.65	0.75

ตารางที่ ก. 6 ผลของน้ำหนักวัสดุดูดซับต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

น้ำหนัก (mg)	Concentration (mg/l)		
	BCA	BNS	BHP
30	9.51	8.01	8.52
60	8.95	7.13	7.91
120	7.53	4.50	5.53
240	5.59	2.09	3.23
300	4.85	1.80	2.79
600	3.12	0.92	1.54





ภาคผนวก ข

รูปประกอบการสังเคราะห์ไบโอชาร์จากเหง้ามันสำปะหลัง



รูปที่ ข.1 การเตรียมวัสดุชีวมวลจากเหง้ามันสำปะหลัง



แห้งมันสำปะหลัง 10 กรัม



ไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 300 400 500 องศาเซลเซียส
เป็นระยะเวลา 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 ชั่วโมง



ภาคผนวก ค

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Synthesis of Cassava Rhizome Biochar for Methomyl Adsorption

Lalita kamolklang¹, Pariyapom seekhumlek¹ and Apichon Watcharenwong^{*2}

¹Master student, School of Environmental Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000

^{*2}Lecturer, Ph.D, School of Environmental Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000
Tel : 089-201-9975, Fax : +66-44-22-4220, e-mail : w.apichon@sut.ac.th

ABSTRACT

This research aims to study the synthesis of biochar from cassava rhizomes and the factors involved in the absorption of methomyl. The factors of interest in the synthesis of biochar include the pyrolysis temperatures of 300, 400, and 500 °C and the pyrolysis time of 2.5 hours under nitrogen gas conditions, and the obtained biochar was modified with phosphoric acid to increase the efficiency of adsorption. The biochar obtained from the synthesis will be examined using various techniques, including CHN/O, BET, SEM, FTIR, XTM, etc. The factors in the study of adsorption that are of interest include contact time agitation speed and pH value, etc. The study found that the temperature and duration of pyrolysis affect the quality of biochar. The selected biochar was obtained at 500 °C for 2.5 hours with the highest %C of 78.149 and the lowest H/C of 0.026, which is similar to other research studies. The biochar is of high quality and will have a stable C ratio, and low H/C. A higher carbon content will result in a more stable biochar. Modifying biochar with phosphoric acid results in increasing the physical and chemical goods. The specific surface area from BET measurement and average pore diameter from XTM analysis (from Synchrotron Light Research Institute (SLRI)) both increased from 2.29 to 3.39 (m²/g) and 1.57 to 6.54 (Å), respectively. For methomyl adsorption experiments, it was found that equilibrium was reached after 180 minutes. The rotational speed and pH value affected the adsorption efficiency. The optimum condition for methomyl adsorption was with an agitation speed of 200 rpm at pH 3 with an efficiency of 27.90 %.

Keywords : biochar; cassava rhizomes; methomyl; pesticides; phosphoric acid

INTRODUCTION

At present, the agricultural sector uses pesticides in farming, resulting in the accumulation of pesticides in the environment. When pesticide accumulation exceeds saturation, it will cause the soil to desorption. Pesticides are washed away along with the leaching process of rain that falls into natural water sources [1]. Pesticides contaminating natural water sources can accumulate in the food chain of living things in water sources. This results in an increased risk to human health. Methomyl has been found in groundwater and surface water. It was found at 10 µg/l in groundwater and 30 µg/l in surface water, respectively. The standards for pesticides in soil and surface water should not be more than 0.1 µg/l as regulated by the EU and US EPA [2]. However, the amount of methomyl found was still higher than the standard.

This research is interested in methomyl treatment. From past research studies, various technologies have been used to treat methomyl, such as absorption, photodegradation, and advanced oxidation processes. Adsorption is widely used in removing pesticides because it is easy to use and inexpensive [2]. Biochar is a carbon-rich product used as an adsorbent to remove contaminants in water supplies by the physical surface and chemical properties of biochar. Biochar production is also relatively low-cost. Most of the starting materials are waste materials from industrial and agricultural industries. This led to interest in the synthesis of biochar from biomass. In this research, the starting raw material for producing biochar is cassava rhizome because cassava is one of the economic crops of Thailand. From the study of Aup-Ngoen in 2020, it was found that the highest percentage of carbon content was cassava rhizome compared with durian peel, pineapple peel, and corncob, so it was considered a starting material that can be used to produce biochar [3]. Adsorption of the atrazine and imidacloprid using phosphoric acid modified-biochar from agricultural waste showed the maximum adsorption efficiency of atrazine was 70.7% and imidacloprid was 77.8%, respectively. The phosphoric acid treatment increased the absorption of both pesticides Type [4].

METHODOLOGY

Preparation and modification of biochars

Preparation of biochars: 10 g of cassava rhizomes were pyrolysis at temperatures of 300, 400, and 500 °C for 2.5 hours with an increasing rate of temperature at 5°C/minute under nitrogen gas conditions.

Modification of biochars: Briefly, 10 g were immersed in 100 mL 14% H₃PO₄ solution for 24 hours. at 25°C. After that, the phosphoric-modified biochars were washed with distilled water until the pH of the supernatants was stable. Subsequently, the supernatants were discarded and the biochars were oven-dried overnight at 105°C.

Characterization of biochars

A total elemental composition such as carbon, hydrogen, nitrogen, and oxygen was measured by the elemental analyzer. Brunauer–Emmett–Teller (BET) was used to detect specific surface areas of biochars. Fourier transform infrared (FTIR) spectra of biochars were conducted by an FTIR instrument. The morphology of the biochar was determined via scanning electron microscopy (SEM) and Synchrotron X-ray tomographic microscopy (XTM) at beamline 1.2W was operated at 1.2GeV, 150 mA in Synchrotron Light Research Institute (SLRI) were characterized the porosity by Octopus Analysis software and rendered in 3D tomographic reconstruction by using Drishti software. A laser scattering particle size distribution analyzer was used to measure the size and particle distribution of the material. Point of zero charge with salt addition technique To determine the charge on the surface of biochar.

Adsorption experiments

Varying methomyl pH solutions (3, 5, 7, 9, and 11) and varying agitation speeds (100, 150, 200, and 250 rpm) were also investigated in separate experiments. Batch experiments were conducted using an orbital shaker at an agitation speed of 200 rpm at room temperature. To an Erlenmeyer flask filled with 10 mg/L methomyl (aq), a specific mass of biochar (1 g/L) was added. Equilibrium studies were performed by shaking the suspension containing biochar and methomyl for a specific time interval, up to a maximum of 360 min. Samples were collected periodically at the designated time and filtered through a 0.45-µm Nylon filter before methomyl analysis. Methomyl removal efficiencies were measured in triplicates following a specific protocol for each condition. The filtrate was analyzed for pesticide concentrations using high-pressure liquid chromatography (HPLC) techniques.

RESULTS AND DISCUSSIONS

Characterization of biochars

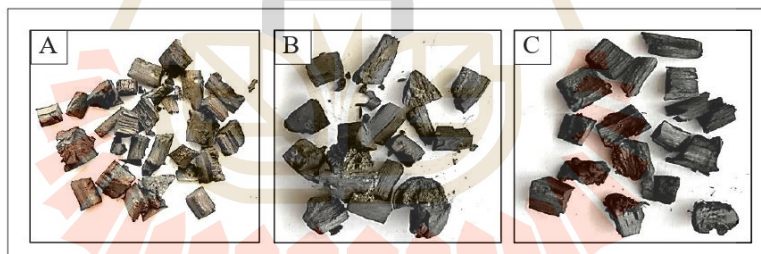


Figure 1. Photograph of physical characteristics of biochar synthesis from cassava rhizomes.

(A) Biochar cassava rhizomes 300 °C/2.5 hr., (B) Biochar cassava rhizomes 400°C/2.5 hr.,
(C) Biochar cassava rhizomes 500°C/2.5hr.

From Figure 1, it is found that the physical characteristics of biochar at a temperature of 300 °C are somewhat brownish, similar to wood. Therefore, it is assumed that there is incomplete combustion. For biochar at 400 and 500 °C, the color is completely black. Therefore, it is assumed that it becomes complete biochar. Therefore, only biochar at 400 and 500 °C was selected to be analyzed with CHN/O to analyze the composition.

- 192 -

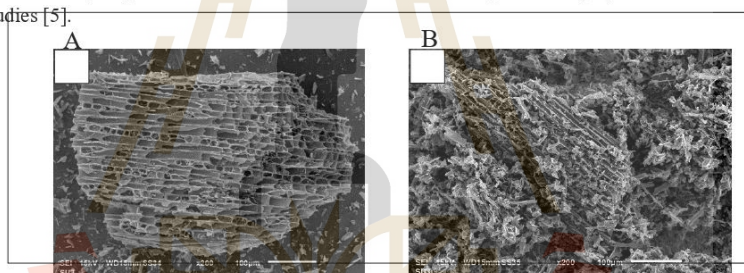
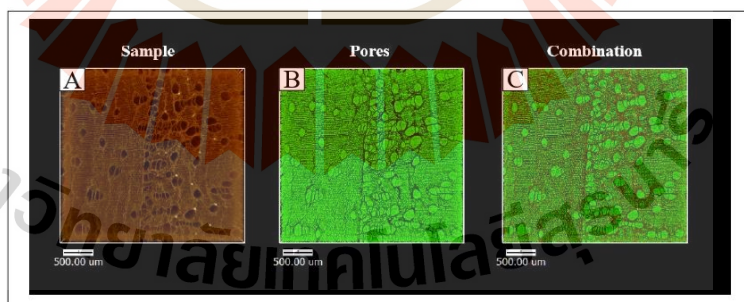
Table 1 Organic elemental compositions

Sample Biochar	% C	% H	% N	Ratio H/C
400 °C / 2.5 hr.	75.132	3.7878	1.7910	0.0504
500 °C / 2.5 hr.	78.149	2.0398	0.6919	0.0261

Table 2 Physiochemical characteristics of biochars from BET analysis.

Sample	Surface Area (m ² /g)	Average pore diameter (Å)	Total pore volume (cc/g)
Biochar CA	2.29E+00	1.57E+02	1.76E-02
Biochar+ H ₃ PO ₄	3.39E+00	6.54E+02	1.33E-02

From Table 1. It was found that biochar synthesized at a temperature of 500 °C 2.5 hr. had the highest carbon content of 78.149 % and the H/C ratio was 0.026, which was like other research studies. High-quality biochar has a stable C ratio and a low H/C ratio. The selected biochar is then treated with phosphoric acid. From Table 2., the modification of phosphoric acid can increase the specific surface area of biochar produced from cassava rhizomes as proved by BET analysis. Even if the change in specific surface area is small. The phosphoric acid-modified biochar showed a higher average pore diameter similar to Peng's studies [5].

**Figure 2.** SEM images of (A) Biochars CA.
(B) BiocharCA + H₃PO₄.**Figure 3.** Results of the X-ray Tomographic Microscopy (XTM) technique of the synthesized biochar cassava rhizomes 500°C/2.5 hr.

- 193 -

From Figure 2, the modification results in adhesion occurring between the phosphoric acid and the pore structure on the biochar surface. Until you can barely see the pore structure. This corresponds to the BET and FTIR result values with an increase in the specific surface area and functional groups. The 3D X-ray characteristics and porosity (%) of biochar were studied using the X-ray Tomographic Microscopy (XTM) technique from Synchrotron Light Research Institute (SLRI). XTM results in Figure 3 show a 3D X-ray image in which Figure 3A shows only biochar solid structure (brown color), Figure 3B shows only the pore in the biochar sample, and Figure 3C shows both biochar solid structure combined with pore in structure. From XTM measurement, a porosity of 28% was obtained, which means that the remaining 72% was solid biochar.

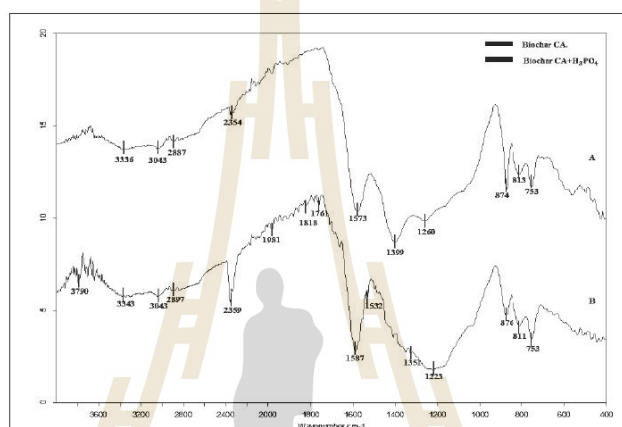


Figure 4. FTIR spectra of BiocharCA. and BiocharCA + H₃PO₄.

The results of the Fourier transform infrared spectrophotometer (FTIR) are shown in Figure 4. A peak at 3200-3800 cm⁻¹ was found in both biochar and modified biochar, which were found to be O-H bonds [6]. A peak at 2850-3000 cm⁻¹ was found in both biochar and modified biochar, which were found to be C-H stretching. A peak at 1400-1600 cm⁻¹ was found in both biochar and modified biochar, which were found to be C=C stretching [7], it can be seen that both types of biochar changes can be seen in the wavenumber range of 1200-1400. Phosphoric acid treatment shows an increase in the formation of P=O, P=OOH groups, which is similar to Peng's studies [5] where P=O, P=OOH groups were detected after treatment with phosphoric acid. Research has studied the size of biochar for adsorption. It was found that small biochar had increased adsorption. Therefore, biochar is crushed before use [8]. The size and distribution were then measured using a laser scattering particle size distribution analyzer. For the particle size distribution analysis technique using laser scattering, it was found that the particle size distribution of biochar was in the range of 10 – 300 μm and the average particle size was 54 μm. As shown in Figure 5.

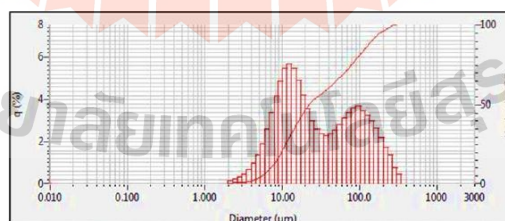


Figure 5. Measurement of size and distribution of biochar particles

- 194 -

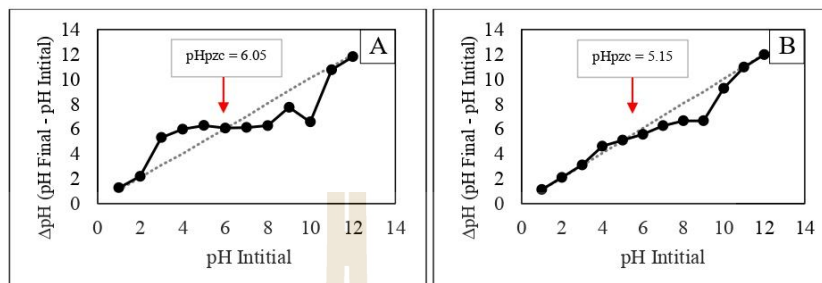


Figure 6. Points of Zero Charge (pH_{pzc}) of biochar.
(A) biochar from cassava rhizomes (B) biochar from cassava rhizomes modified with phosphoric acid.

By studying the pH value at zero surface charge, points of zero charge of the adsorbent are shown in Figure 6, where the value refers to the pH at which the sum of the surface charges of the adsorbent is equal to zero. When the pH value of the solution is lower than the value, it will cause the surface of the adsorbent to display a positive charge. When the pH value of the solution is higher than the value, it will cause the surface of the adsorbent to display a negative charge [9]. The results of this study found that the point of zero charge of biochar from cassava rhizomes is 6.05, meaning that at pH of 6.05, the surface charge of cassava rhizome biochar is zero and the of cassava rhizome biochar modified with phosphoric acid is 5.15 shown in Figure 6B.

Adsorption Experiment

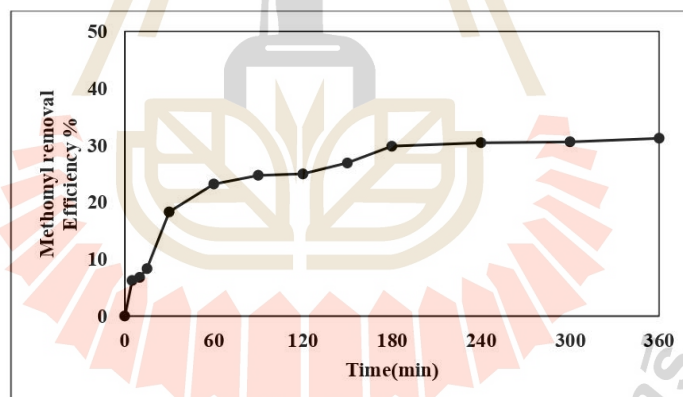


Figure 7. Effect of the contact time
Initial concentration methomyl 10 mg/l, biochar 1 g, Initial pH 6.20, agitation speed 200 rpm.

The ability to absorb methomyl by biochar from cassava rhizomes modified with phosphoric acid increases with increasing contact time and the adsorption rate increases rapidly during the first 180 minutes as shown in Figure 7. But over time, the adsorption rate caused by the movement of methomyl molecules in the adsorbent particles begins to slow down until equilibrium is reached at a contact time of 180 minutes. The adsorption capacity is most remarkable from 180 to 360 minutes, during which the adsorption rate is

- 195 -

equal to the desorption speed. This study found that during the contact period of 180 minutes, the efficiency was 29.84%.

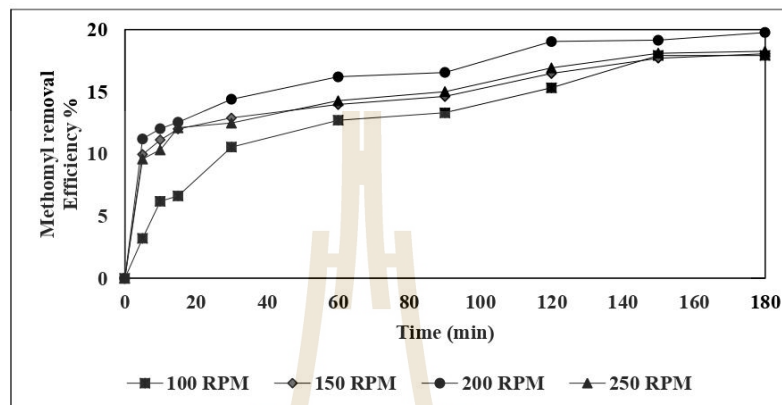


Figure 8. Effect of the agitation speed
Initial concentration methomyl 10 mg/l, biochar from cassava rhizomes
modified with phosphoric acid 1 g, Initial pH 6.00.

From Figure 8, it can be seen that when increasing the agitation speed, the methomyl adsorption efficiency by biochar was increased. But when the speed is increased to more than 200 rpm, the adsorption efficiency starts to decrease. This is because the effect of turbulence is one of the key factors that are important in controlling the solid-liquid mass transfer mechanism [10]. Figure 9 shows that the pH of the solution has an important influence on the adsorption behavior of methomyl. The adsorption efficiency of methomyl decreased with increasing pH, but when the pH increased to 11, methomyl decomposed into other compounds. Resulting in the remaining methomyl value is less than it should be [9]. From research of Akl, M. A., *et al.* (2016), in the pH range of 2-8, methomyl is relatively stable. In contrast, when the pH increased to 10, the residual methomyl content was only 12% of the original value. Moreover, at pH values as high as 12, methomyl was completely degraded into other compounds. This means that methomyl is relatively degraded in the basic solution. Therefore, the effect of pH on the adsorption capacity was investigated in the range of pH 2-8 [11].

- 196 -

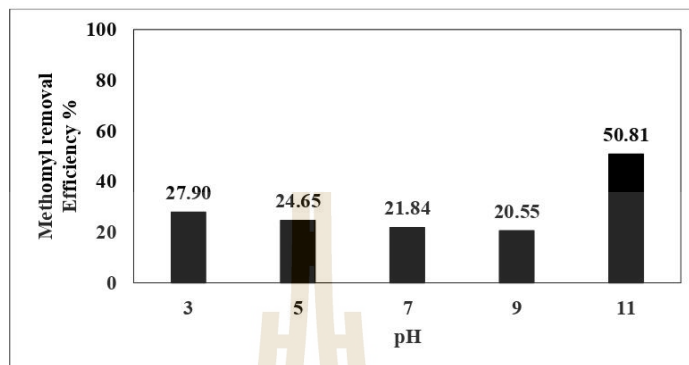


Figure 9. Effect of pH
Initial concentration methomyl 10 mg/l, biochar from cassava rhizomes
modified with phosphoric acid 1 g, agitation speed 200 rpm.

CONCLUSION

In this study, biochar was produced from cassava rhizomes. It was found that the best condition for the synthesized biochar was 500°C for 2.5 hours, resulting in a 78.149% carbon content and an H/C ratio of 0.026. The biochar is of high quality and will have a stable carbon ratio, low H/C ratio, and a higher carbon content, which will result in a more stable biochar, respectively. Therefore, we chose to further study it by modifying it with phosphoric acid. XTM measurements revealed a porosity of 28%, meaning that the remaining 72% was solid biochar. Modifying the biochar with phosphoric acid increased physical and chemical properties. The specific surface area measured by BET and the average pore diameter both increased from 2.29 to 3.39 m²/g and 1.57 to 6.54 Å, respectively. Additionally, there were more functional groups present than before. Phosphoric acid treatment showed an increase in the formation of P=O and P=OOH groups, which is similar to Peng's studies [5]. From the results of the adsorption experiment, it can be seen that the adsorption capacity is most remarkable from 180 to 360 minutes, during which the adsorption rate equals the desorption speed. The agitation speed and pH affect the adsorption efficiency. The optimal conditions are a stirring speed of 200 rpm, and a pH of 3, resulting in an efficiency of 27.90%. In the pH range of more than 10, methomyl will be decomposed into other compounds, which is not a mechanism of adsorption.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by (i) Suranaree University of Technology (SUT), (ii) Thailand Science Research and Innovation (TSRI), and (iii) National Science, Research and Innovation Fund (NSRF) - Grant no. 179270.

References

- [1] Zhao, X., Ouyang, W., Hao, F., Lin, C., Wang, F., Han, S., & Geng, X. (2013). Properties comparison of biochars from corn straw with different pretreatment and sorption behaviour of atrazine. *Bioresource Technology*, 147, 338-344.
- [2] Srikhaow, A., Chaengsawang, W., Kiatsiriroat, T., Kajitvichyanukul, P., & Smith, S. M. (2022). Adsorption kinetics of imidacloprid, acetamiprid and methomyl pesticides in aqueous solution onto eucalyptus woodchip derived biochar. *Minerals*, 12(5), 528.
- [3] Aup-Ngoen, K., & Noipitak, M. (2020). Effect of carbon-rich biochar on mechanical properties of PLA-biochar composites. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 15, 100204.
- [4] Mandal, A., Singh, N., & Purakayastha, T. J. (2017). Characterization of pesticide sorption behaviour of slow pyrolysis biochars as low cost adsorbent for atrazine and imidacloprid removal. *Science of the Total Environment*, 577, 376-385.

- 197 -

- [5] Peng, H., Gao, P., Chu, G., Pan, B., Peng, J., & Xing, B. (2017). Enhanced adsorption of Cu (II) and Cd (II) by phosphoric acid-modified biochars. *Environmental Pollution*, 229, 846-853.
- [6] Salami, A., Vilppo, T., Pitkänen, S., Weisell, J., Raninen, K., Vepsäläinen, J., & Lappalainen, R. (2020). Cost-effective FTIR and ¹H NMR spectrometry used to screen valuable molecules extracted from selected West African trees by a sustainable biochar process. *Scientific African*, 8, e00315.
- [7] Abdullah, N., Taib, R. M., Aziz, N. S. M., Omar, M. R., & Disa, N. M. (2023). Banana pseudo-stem biochar derived from slow and fast pyrolysis process. *Heliyon*, 9(1).
- [8] Zheng, W., Guo, M., Chow, T., Bennett, D. N., & Rajagopalan, N. (2010). Sorption properties of greenwaste biochar for two triazine pesticides. *Journal of hazardous materials*, 181(1-3), 121-126.
- [9] Yang, G. P., Zhao, Y. H., Lu, X. L., & Gao, X. C. (2005). Adsorption of methomyl on marine sediments. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 264(1-3), 179-186.
- [10] Agarwal, S., Sadeghi, N., Tyagi, I., Gupta, V. K., & Fakhri, A. (2016). Adsorption of toxic carbamate pesticide oxamyl from liquid phase by newly synthesized and characterized graphene quantum dots nanomaterials. *Journal of Colloid and Interface Science*, 478, 430-438.
- [11] Akl, M. A., Youssef, A. F. M., Hassan, A. H., & Maher, H. (2016). Synthesis, characterization and evaluation of peanut shells-derived activated carbons for removal of methomyl from aqueous solutions. *J Environ Anal Toxicol*, 6(352), 2161-0525.



ประวัติผู้เขียน

นางสาวลลิตา กมลกลาง เกิดเมื่อวันที่ 25 ธันวาคม พ.ศ.2539 จังหวัดนครราชสีมาสำเร็จศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนมารีย์วิทยา อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา ในปีการศึกษา 2558 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจากสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2562 และได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท ในปีการศึกษาถัดมา โดยได้รับทุนการศึกษา OROG ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี บัณฑิตศึกษาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เมื่อเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทได้ศึกษาและวิจัยในหัวข้อ “การสังเคราะห์ไบโอชาร์จากเหง้ามันสำปะหลังสำหรับการดูดซับสารเมโทมิล” ในขณะที่ศึกษาอยู่ได้มีโอกาสเป็นผู้ช่วยสอนในรายวิชาของสาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม เพื่อเป็นการเพิ่มพูนความรู้ใหม่ ทักษะการวิจัย รู้จักการแก้ปัญหา และการทำงานกันเป็นกลุ่มเพื่อบรรลุเป้าหมาย ที่วางไว้ นอกจากนี้มีโอกาสเข้าร่วมการนำเสนอผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ 13th International Conference on Environmental Engineering, Science and Management May 9-10, 2024. Pullman Khon Kaen Raja Orchid, Khon Kaen, Thailand โดยนำเสนอในหัวข้อ “SYNTHESIS OF CASSAVA RHIZOME BIOCHAR FOR METHOMYL ADSORPTION” และมีโอกาสเข้าร่วมการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 22 "Clean Environment towards Climate Neutrality and SDGs" วันที่ 17-18 พฤษภาคม 2566 โรงแรมจอมเทียน ปาล์ม บีช โฮเทล แอนด์ รีสอร์ท พัทยา โดยนำเสนอหัวข้อ “การสังเคราะห์ไบโอชาร์จากเหง้ามันสำปะหลัง” และได้มีการตีพิมพ์ใน Thai Environmental Engineering Journal หัวข้อเรื่อง “Synthesis of Cassava Rhizome Biochar for Methomyl Adsorption” Vol. 38 No. 3 (2024) จำนวน 1 ฉบับ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี