บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพ และทางเคมีของไบโอชาร์จากเหง้ามันสำปะหลัง (BCA) ไบโอชาร์ที่ดัดแปลงด้วยโซเดียมซิลิเกต (BNS) และไบโอชาร์ที่ดัดแปลงด้วยกรดฟอสฟอริก (BHP) จากนั้นนำไปดูดซับสารละลายเมโธมิลในการทดลองแบบแบตช์ จากการศึกษาข้างต้นสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 สรุปคุณสมบัติของไบโอชาร์จากเหง้ามันสำปะหลัง

จากการสังเคราะห์ไบโอชาร์จากเหง้ามันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 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 มีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยที่สุดท่ากับ 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 และแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตกับเมโธมิล นอกจากนี้การศึกษาค่าประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ ซึ่งแสดงถึงค่าความเป็นกลางของประจุบนพื้นผิวของไบโอชาร์ พบว่า BNS มีค่าประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ ต่ำที่สุดคือ 2.60 หมายความว่าในสภาวะที่ค่าพีเอชสูงกว่านี้ ผิวของไบโอชาร์จะมีประจุลบ ส่งผลให้เหมาะสมต่อการดูดซับเมโธมิลที่มีขั้วหรือสารที่มีประจุบวกได้ดีขึ้น สำหรับ BHP มีค่าพีเอชที่ประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ เท่ากับ 5.26 ซึ่งยังอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าสถิตระหว่างสารเมโธมิลกับหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิววัสดุ ทั้งนี้ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีทั้งหมดบ่งชี้ว่า การดัดแปลงไบโอชาร์ด้วยสารเคมีสามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและคุณสมบัติบนพื้นผิวได้ และช่วยเพิ่มศักยภาพในการดูดซับสารเคมีปราบศัตรูพืชได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

5.1.2 สรุปผลการศึกษาผลการบำบัดเมโธมิล

จากการศึกษาการดูดซับเมโธมิลของ BCA BNS และ BHP ภายใต้สภาวะการทดลองที่แตกต่างกัน พบว่ามีปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับอย่างชัดเจน โดยเฉพาะในด้านของระยะเวลา ความเร็วรอบ ค่าพีเอช และน้ำหนักของตัวดูดซับ สำหรับผลของเวลา พบว่ากระบวนการดูดซับเข้าสู่ภาวะสมดุลภายใน 1440 นาที โดย BHP แสดงประสิทธิภาพสูงสุดในการลดความเข้มข้นของเมโธมิล โดยมีค่าอัตราส่วน C/C_0 ต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอื่น ซึ่งแสดงถึงการดูดซับที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นตามลำดับเวลา ส่วนในด้านของความเร็วรอบที่ใช้ในการเขย่าแบบเคลื่อนที่เชิงเส้น พบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วรอบจาก 50 100 จนถึง 200 รอบต่อนาที จะช่วยเพิ่มอัตราการดูดซับได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในไบโอชาร์ที่มีการดัดแปลง BNS และ BHP ที่มีโครงสร้างรูพรุนและหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวมากเพียงพอ ซึ่งการเพิ่มความเร็วรอบจะช่วยลดชั้น Boundary Layer ที่ขวางการแพร่ของเมโธมิลเข้าสู่พื้นผิวของตัวดูดซับ และส่งเสริมการเข้าสู่รูพรุนได้ดีขึ้น สำหรับการศึกษาผลของค่าความเป็นกรดด่างพบว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการดูดซับเมโธมิลคือค่าความเป็นกรดด่างเท่ากับ 3 ซึ่งเป็นช่วงที่โมเลกุลของเมโธมิลที่อยู่ในกลุ่มคาร์บาเมตโมเลกุลมีประจุบวก ส่งผลให้สามารถเข้าไปจับกับหมู่ฟังก์ชันที่เป็นขั้วของไบโอชาร์ได้ง่าย โดยเฉพาะ BNS ที่มีค่าประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ ต่ำที่สุดและพื้นผิวแสดงประจุลบในช่วงค่าความเป็นกรดด่างดังกล่าว ทำให้สามารถดูดซับเมโธมิลที่มีคุณสมบัติเป็นโมเลกุลที่มีขั้วได้ดียิ่งขึ้น รองลงมาคือ BHP ซึ่งแสดงการตอบสนองที่ดีเช่นกัน ส่วนในค่าความเป็นกรดด่างสูงเท่ากับ 11 พบว่าเป็นการสลายตัวของเมโธมิลในสภาวะด่าง สุดท้ายในการศึกษาผลของน้ำหนักตัวดูดซับ พบว่าการเพิ่มน้ำหนักของไบโอชาร์ตั้งแต่ 30 ไปจนถึง 600 มิลลิกรัม โดยที่ 600 มิลลิกรัม ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้นสูงที่สุด BNS BHP BCA สามารถลดค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของเมโธมิลจาก 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ไปเป็น 0.92 1.54 3.12 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับซึ่งแสดงถึงการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสและจำนวน active sites ที่มีอยู่บนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันจำเพาะ ช่วยส่งเสริมการดูดซับเมโธมิลได้ดียิ่งขึ้น ทั้งนี้ จากผลทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่า การดัดแปลงไบโอชาร์ด้วยโซเดียมซิลิเกต และกรดฟอสฟอริกสามารถเพิ่มศักยภาพในการดูดซับเมโธมิลได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อเทียบกับไบโอชาร์จากเหง้ามันสำปะหลังที่ไม่ได้รับการดัดแปลง

5.1.3 ไอโซเทิร์มและจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

จากการศึกษาพฤติกรรมการดูดซับของเมโธมิลบน BCA BNS และ BHP ได้แก่ พบว่าแบบจำลองไอโซเทิร์มของ Langmuir สามารถอธิบายกระบวนการดูดซับได้ดีที่สุด โดยให้ค่าความสัมพันธ์ R^2 สูงในทุกกรณี ได้แก่ BNS เท่ากับ 0.9813 BHP เท่ากับ 0.9693 และ BCA เท่ากับ 0.8635 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การดูดซับของเมโธมิลบนพื้นผิวของไบโอชาร์มีลักษณะเป็นแบบชั้นเดียวบนพื้นผิวที่เป็นเนื้อเดียวกัน (Monolayer adsorption) ในส่วนของจลนพลศาสตร์ของการดูดซับผลการทดลองสอดคล้องกับแบบจำลองลำดับสองเทียม มากกว่าแบบจำลองลำดับหนึ่งเทียมโดยให้ค่า R^2 สูงถึง 0.9995 สำหรับ BCA และ BHP และ 0.9743 สำหรับ BNS แสดงให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับควบคุมโดยการเกิดปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิวของไบโอชาร์ ค่าอัตราเร็วของการดูดซับ (K_2) ในแบบจำลองลำดับสองเทียม พบว่า BHP มีค่า K_2 สูงที่สุดคือ 0.3263 กรัมต่อมิลลิกรัมต่อนาทีรองลงมาคือ BNS เท่ากับ 0.0320 กรัมต่อมิลลิกรัมต่อนาที และ BCA เท่ากับ 0.0021 กรัมต่อมิลลิกรัมต่อนาที ซึ่งแสดง

ให้เห็นว่าไบโอชาร์ที่ผ่านการดัดแปลงด้วยกรดฟอสฟอริกมีความเร็วในการดูดซับสูงที่สุด และเหมาะสมต่อการกำจัดเมโธมิลออกจากสารละลาย ทั้งนี้ค่าการดูดซับที่สมดุล (q_e) ของ BHP อยู่ที่ 2.055 มิลลิกรัมต่อกรัมซึ่งสูงกว่าทุกชนิด สอดคล้องกับผลจากแบบจำลองไอโซเทิร์ม สรุปได้ว่าไบโอชาร์ BNS และ BHP มีประสิทธิภาพในการดูดซับเมโธมิลที่สูงกว่า BCA ซึ่งแสดงถึงศักยภาพของการดัดแปลงด้วยโซเดียมซิลิเกต และกรดฟอสฟอริกในการเพิ่มสมบัติของวัสดุดูดซับเพื่อใช้ในระบบการบำบัดเมโธมิลในน้ำ

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรศึกษาขยายผลการวิจัยไปยังสารกำจัดศัตรูพืชชนิดอื่นในกลุ่มคาร์บาเมท เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับของไบโอชาร์อย่างครอบคลุมยิ่งขึ้น และประเมินศักยภาพการประยุกต์ใช้ในระบบบำบัดน้ำจริง

5.2.2 ควรศึกษาเพิ่มเติมในระบบไหลต่อเนื่อง (Continuous Flow System) เช่น คอลัมน์ดูดซับ เพื่อประเมินประสิทธิภาพของไบโอชาร์ภายใต้สภาวะที่ใกล้เคียงกับการใช้งานจริงมากขึ้น ซึ่งจะช่วยพัฒนาไปสู่การใช้งานเชิงอุตสาหกรรม

5.2.3 ควรศึกษาความสามารถในการนำวัสดุดูดซับกลับมาใช้ใหม่ (Regeneration) ของไบโอชาร์ที่ดัดแปลงแล้ว เพื่อประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และความยั่งยืนในการใช้งานในระยะยาว

5.2.4 ควรศึกษาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของไบโอชาร์หลังการใช้งาน โดยเฉพาะในด้านการจัดการของเสีย การย่อยสลาย หรือการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่น ๆ เช่น ปรับปรุงคุณภาพดิน เพื่อให้การประยุกต์ใช้ไบโอชาร์เป็นไปอย่างปลอดภัยและยั่งยืน

5.2.5 ควรมีการเก็บข้อมูลการใช้สารเคมี หรือการใช้พลังงานเพื่อนำมาประเมินความคุ้มทุนเพิ่มเติม