บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาการสังเคราะห์วัสดุดูดซับแอโรเจลผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ โดยใช้ชานอ้อยจากของเสียภาคอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาลเป็นวัตถุดิบหลักในการสังเคราะห์วัสดุดูดซับดังกล่าว วัสดุดูดซับที่สังเคราะห์ได้ถูกนำไปใช้ในการ กำจัดสารเมโธมิลร่วมกับสารเปอร์ซัลเฟต ซึ่งงานวิจัยนี้มีการศึกษาคุณลักษณะสมบัติของวัสดุดูดซับแอโรเจลผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์เป็นส่วนสำคัญ รวมถึงการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมโธมิลภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ การศึกษาในงานวิจัยนี้จึงแบ่งออกเป็นสองส่วนหลัก ได้แก่ การสังเคราะห์และศึกษาคุณลักษณะสมบัติของวัสดุดูดซับแอโรเจลผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ และการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมโธมิลโดยใช้วัสดุที่สังเคราะห์ขึ้น

5.1.1 การศึกษาคุณลักษณะสมบัติของแอโรเจลผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติของแอโรเจลที่สังเคราะห์จากเซลลูโลสของชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพทางเคมีและผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่ (1) การปรับสภาพชานอ้อยทางเคมี และ (2) การวิเคราะห์คุณลักษณะของแอโรเจลและแอโรเจลผสมสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ ผลจากการปรับสภาพชานอ้อยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และกรดซัลฟิวริก แสดงให้เห็นว่าสามารถกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลสออกจากเส้นใยได้อย่างมีประสิทธิภาพ พร้อมทั้งเกิดการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของเส้นใย ซึ่งส่งผลให้โครงสร้างของเซลลูโลสมีความเป็นระเบียบมากขึ้นและมีค่าดัชนีผลึกเพิ่มขึ้น ตามที่ยืนยันจากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR และ XRD

จากการสังเคราะห์แอโรเจลจากเซลลูโลสชานอ้อยผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ พบว่าโครงสร้างของวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน โดยการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM แสดงให้เห็นว่าอนุภาคสังกะสีกระจายตัวในบนพื้นผิวของแอโรเจล และผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XTM พบว่าแอโรเจลมีค่าความพรุนลดลงเมื่อมีการผสมสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ ซึ่งคาดว่าเกิดจากการอนุภาคของสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ภายในโครงสร้างของแอโรเจล ทำให้บางส่วนของรูพรุนถูกปิดกั้น นอกจากนี้ การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET ยังแสดงให้เห็นว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของแอโรเจลบริสุทธิ์อยู่ที่ 0.7125 ตารางเมตรต่อกรัม ในขณะที่ แอโรเจลที่ผสมสังกะสีประจุศูนย์ซัลไฟด์มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะลดลงเหลือ 0.4996 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับค่าความพรุนที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XTM

ดังนั้นผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงแอโรเจลด้วยสังกะสีประจุศูนย์ที่เติมซัลไฟด์ ส่งผลต่อโครงสร้างและสมบัติทางกายภาพของแอโรเจลโดยเฉพาะในด้านความพรุนและพื้นที่

ผิวจำเพาะ ข้อมูลดังกล่าวมีความสำคัญต่อการนำแอโรเจลไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับสำหรับการกำจัดสารมลพิษ เช่น เมโธมิล ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียในขั้นตอนถัดไป

5.1.2 การศึกษาการบำบัดสารเมโธมิล

การศึกษานี้มุ่งเน้นการสังเคราะห์วัสดุดูดซับแอโรเจลและแอโรเจลที่ผสมสังกะสีประจุศูนย์ซัลไฟด์ เพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุสำหรับกำจัดสารเมโธมิลร่วมกับสารเปอร์ซัลเฟต โดยพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด ได้แก่ 1) ชนิดของแอโรเจล 2) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเปอร์ซัลเฟต 3) ระยะเวลาสัมผัส 4) ความเร็วรอบในการกวน และ 5) ค่าความเป็นกรดด่าง การทดลองดำเนินการโดยตรวจวัดความเข้มข้นของสารเมโธมิลด้วยเทคนิค HPLC ซึ่งช่วยให้สามารถวิเคราะห์ความเข้มข้นได้อย่างแม่นยำและศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารเมโธมิลเปรียบเทียบกับเวลา ได้ผลสรุปดังต่อไปนี้

1) ในการศึกษาผลของชนิดของแอโรเจลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารเมโธมิล ได้ทำการทดลองภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด โดยใช้ความเข้มข้นของสารเมโธมิลเริ่มต้นที่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟตที่ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการกวนสารละลายด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาที และเก็บตัวอย่างที่ช่วงเวลาต่าง ๆ ตั้งแต่ 0 ถึง 120 นาที วัสดุดูดซับที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีทั้งหมด 3 ชนิด และจากผลการทดลองพบว่า แอโรเจลที่ผ่านการปรับปรุงด้วยซัลไฟด์มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมโธมิลสูงสุด โดยสามารถกำจัดได้ถึงร้อยละ 53.3 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่มากกว่าวัสดุดูดซับชนิดอื่น ๆ ผลลัพธ์ดังกล่าวอาจเกิดจากสมบัติทางเคมีและกายภาพของวัสดุที่ได้รับการปรับปรุงทำให้สามารถเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของเปอร์ซัลเฟตและเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารมลพิษได้สูงขึ้น ดังนั้น แอโรเจลที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์จึงเป็นวัสดุดูดซับที่มีศักยภาพสูงสำหรับการกำจัดสารเมโธมิล

2) ในการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเปอร์ซัลเฟตต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารเมโธมิล ได้ดำเนินการทดลองภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด โดยใช้ความเข้มข้นของสารเมโธมิลเริ่มต้นที่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟตที่ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการกวนสารละลายที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที และเก็บตัวอย่างที่ช่วงเวลาต่าง ๆ ได้แก่ 0 5 10 20 30 60 90 และ 120 นาที เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของสารเมโธมิล ผลการทดลองพบว่า แอโรเจลที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์มีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดสารเมโธมิลที่ร้อยละ 53.1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแม้ว่าการเพิ่มความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตจะช่วยเพิ่มอัตราการทำลายเมโธมิลได้อย่างรวดเร็วในช่วงแรกของปฏิกิริยา แต่เมื่อความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตสูงขึ้น อาจเกิดผลกระทบจากการจับตัวกันของอนุมูลอิสระซัลเฟต ทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมลดลงเมื่อเทียบกับเงื่อนไขที่ใช้เปอร์ซัลเฟตในปริมาณที่เหมาะสม ดังนั้น การเลือกใช้ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตที่เหมาะสมจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงถึง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมโธมิลโดยไม่ก่อให้เกิดผลกระทบเชิงลบต่อกระบวนการกำจัด

3) การศึกษาผลของระยะเวลาในการสัมผัสต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารเมโธมิล ได้ดำเนินการทดลองโดยใช้ความเข้มข้นของสารเมโธมิลเริ่มต้นที่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้น

ของสารเปอร์ซัลเฟตที่ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายใต้ความเร็วรอบในการกวน 150 รอบต่อนาที โดยทำการเก็บตัวอย่างเพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของสารเมโธมิลในช่วงเวลาต่าง ๆ ตั้งแต่ 0 ถึง 1,440 นาที ผลการทดลองพบว่าแอโรเจลที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมโธมิลเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อเวลาผ่านไปถึง 360 นาที ประสิทธิภาพของการกำจัดเข้าสู่สภาวะสมดุล ดังนั้น ในการศึกษาต่อไปจึงเลือกใช้ระยะเวลาในการสัมผัสที่ 360 นาที

4) การศึกษาผลของความเร็วรอบในการกวนต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารเมโธมิลดำเนินการภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารเมโธมิลเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และสารเปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทำการเก็บตัวอย่างตามช่วงเวลา 0 ถึง 360 นาที ผลการทดลอง พบว่าความเร็วรอบในการกวนส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการกำจัดและการกระจายตัวของสารเปอร์ซัลเฟตในสารละลาย โดยเมื่อเพิ่มความเร็วรอบในการกวนจะช่วยให้เกิดการสัมผัสระหว่างแอโรเจลและสารละลายมากขึ้น ส่งผลให้กระบวนการกำจัดและการออกซิเดชันมีประสิทธิภาพสูงขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อความเร็วรอบสูงเกินไปอาจทำให้เกิดแรงเฉือนที่รบกวนการเกาะติดของสารมลพิษบนพื้นผิวของแอโรเจลและลดประสิทธิภาพโดยรวม ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ประสิทธิภาพของแอโรเจลที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ในการกำจัดสารเมโธมิลมีค่าสูงสุด ดังนั้นจึงเลือกใช้ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาทีเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดสารเมโธมิลในงานวิจัยนี้

5) การศึกษาผลของค่าความเป็นกรดด่างต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารเมโธมิลดำเนินการภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารเมโธมิลเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และสารเปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเก็บตัวอย่างตามช่วงเวลา 0 ถึง 360 นาที ผลการทดลองพบว่าค่าความเป็นกรดด่างมีบทบาทสำคัญต่อกลไกการกำจัดเนื่องจากมีผลต่อกระบวนการออกซิเดชันของเปอร์ซัลเฟตและการแตกตัวของสารเมโธมิลในสารละลาย จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพของวัสดุดูดซับแอโรเจลที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์มีค่าสูงสุดที่ pH 9 โดยที่สภาวะนี้ส่งผลต่อการเกิดอนุมูลอิสระซัลเฟตและอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลซึ่งเป็นตัวกลางสำคัญในการทำลายโครงสร้างของสารเมโธมิล ดังนั้นในการศึกษานี้จึงเลือกใช้ค่าความเป็นกรดด่างที่ 9 เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการกำจัดสารเมโธมิลร่วมกับเปอร์ซัลเฟต

6) การศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการกำจัดสารเมโธมิลโดยใช้แอโรเจลที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ร่วมกับสารเปอร์ซัลเฟตโดยพิจารณาปัจจัยความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟต ทั้งนี้เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม และแบบอันดับสองเทียม ผลการศึกษา พบว่าข้อมูลการทดลองสามารถอธิบายได้ดีด้วยแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม เนื่องจากค่า (R^2) มีค่าใกล้เคียง 1 มากกว่าแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ซึ่งบ่งชี้ว่ากลไกหลักของกระบวนการกำจัดสารเมโธมิลเกิดขึ้นโดยกระบวนการดูดซับที่ขึ้นกับความเข้มข้นของสารเมโธมิลในสารละลายเป็นหลัก ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า การกำจัดสารเมโธมิล

ในระบบที่ใช้แอโรเจลที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ร่วมกับสารเปอร์ซัลเฟตสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม

5.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะสำหรับการนำงานไปต่อยอดและการนำไปใช้งานมีดังต่อไปนี้

5.2.1 ผลการศึกษาด้วยเทคนิค XTM แสดงให้เห็นว่าการเติมสารเนฟทาลีนในเซลลูโลสแอโรเจลส่งผลต่อค่าความพรุนของวัสดุ ดังนั้นควรมีการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับอัตราการเติมเนฟทาลีนระหว่างกระบวนการสังเคราะห์เพิ่มเติม เพื่อให้เข้าใจถึงกลไกและผลกระทบที่เกิดขึ้นอย่างเป็นระบบ

5.2.2 จากกระบวนการสังเคราะห์แอโรเจล ควรมีการเพิ่มสัดส่วนในการสังเคราะห์ ได้แก่ สัดส่วนของเซลลูโลส สัดส่วนของสารเชื่อมพันธะ และปัจจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวของกับการสังเคราะห์เพื่อที่จะให้ได้คุณลักษณะของแอโรเจลที่ดีที่สุด

5.2.3 จากกระบวนการสังเคราะห์แอโรเจล ลักษณะของรูปทรงและความหนาของแอโรเจลควรมีการศึกษาเพิ่มเติม

5.2.4 จากกระบวนการสังเคราะห์แอโรเจล โดยมีการเติมสารเชื่อมพันธะเพียงชนิดเดียว ควรมีการศึกษาสารชนิดอื่น ๆ เพิ่มเติม เพื่อเพิ่มศักยภาพให้แอโรเจลมีความแข็งแรงมากขึ้นกว่าเดิม

5.2.5 จากกระบวนการปรับสภาพวัสดุเหลือทางการเกษตร ควรมีการนำวัสดุเหลือทิ้งชนิดอื่น ๆ มาทำการศึกษาเพิ่มขึ้น เช่น เปลือกข้าวโพด ฟางข้าว ผักตบชวา หญ้าเนเปียร์ เป็นต้น

5.2.6 จากกระบวนการปรับสภาพ ควรเลือกวิธีการที่สามารถทำให้เป็นนาโนเซลลูโลสเพื่อที่จะนำไปใช้ในขั้นตอนการสังเคราะห์แอโรเจลให้มีคุณลักษณะสมบัติที่ดีกว่าเดิม

5.2.7 จากการศึกษาการกำจัดสารเมโธมิลด้วยแอโรเจลผสมสังกะสีประจุศูนย์ซัลไฟด์ ควรศึกษาในสภาวะไร้ออกซิเจนเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมโธมิลเพิ่มขึ้น

5.2.8 จากการศึกษาการกำจัดสารเมโธมิลเพียงอย่างเดียว ควรมีการศึกษาสารกำจัดศัตรูพืชหรือวัชพืชชนิดอื่น ๆ เพิ่มเติมด้วยเพื่อนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสารต่าง ๆ