

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปราย

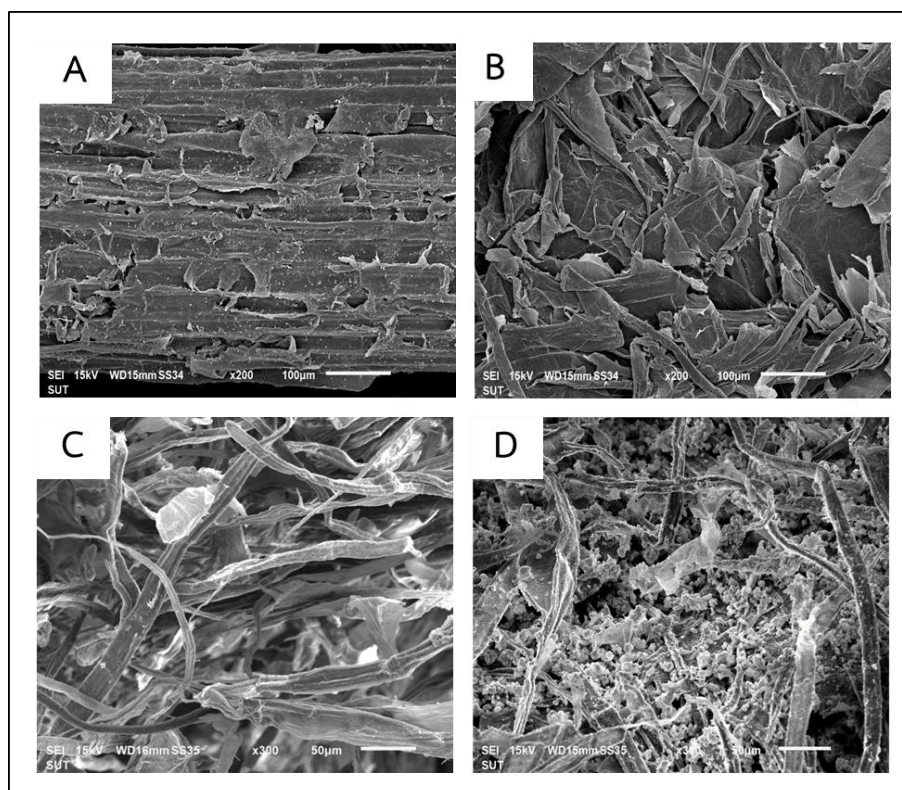
งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสังเคราะห์วัสดุดูดซับแอรโอเจลผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์โดยวัตถุดิบที่ใช้สังเคราะห์นำมาจาก ชานอ้อยจากอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาลเป็นการนำของเสียชานอ้อยที่เหลือทิ้งจากกระบวนการหีบอ้อย เพื่อเอาน้ำอ้อยออกนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์มากขึ้นและเพิ่มมูลค่าของเสียอีกด้วย ซึ่งนำชานอ้อยมาสังเคราะห์เป็นวัสดุดูดซับแอรโอเจลผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ จากนั้นนำวัสดุดูดซับแอรโอเจลที่สังเคราะห์ได้ไปใช้ในการบำบัดสารเมโรมิล ดังนั้นผลการศึกษางานวิจัยนี้ประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ 1) การสังเคราะห์และศึกษาคุณลักษณะสมบัติของแอรโอเจลผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ 2) การศึกษาการกำจัดสารเมโรมิลร่วมกับสารเปอร์ซัลเฟตโดยใช้วัสดุที่สังเคราะห์ขึ้น

#### 4.1 ผลการสังเคราะห์และศึกษาคุณลักษณะสมบัติของแอรโอเจลผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์

จากการสังเคราะห์วัสดุดูดซับแอรโอเจลผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ มีขั้นตอนการสังเคราะห์ทั้งหมด 3 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนการปรับสภาพของเสียชานอ้อย ขั้นตอนการสังเคราะห์แอรโอเจล และขั้นตอนการสังเคราะห์แอรโอเจลผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ และนำไปวิเคราะห์คุณลักษณะสมบัติด้วยเทคนิคต่าง ๆ ได้แก่ เทคนิควิเคราะห์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เทคนิควิเคราะห์ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FTIR) เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) เทคนิควิเคราะห์พื้นที่ผิวและหาความพรุนของอนุภาค (BET) และเทคนิควิเคราะห์ถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์สามมิติระดับจุลภาคด้วยเอกซเรย์ย่านพลังงานสูงจากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอน (XTM) ซึ่งสามารถอธิบายลักษณะสมบัติได้ดังนี้

##### 4.1.1 เทคนิควิเคราะห์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างของวัสดุในระดับจุลภาคถึงนาโนเมตร โดยอาศัยลำอิเล็กตรอนพลังงานสูงยิงไปยังตัวอย่างเพื่อสร้างภาพความละเอียดสูง สัญญาณที่เกิดจากการปฏิสัมพันธ์ระหว่างลำอิเล็กตรอนกับอะตอมในตัวอย่าง เช่น อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electrons) และอิเล็กตรอนสะท้อนกลับ (Backscattered Electrons) จะถูกตรวจวัดและนำมาประมวลผลเป็นภาพที่แสดงรายละเอียดของพื้นผิวในเชิงสามมิติ แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ภาพถ่าย SEM ของชานอ้อยที่กำลังขยาย 200X (A) เซลลูโลสจากชานอ้อยที่กำลังขยาย 200X (B) แอโรเจลที่กำลังขยาย 300X (C) แอโรเจลผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ที่กำลังขยาย 300X (D)

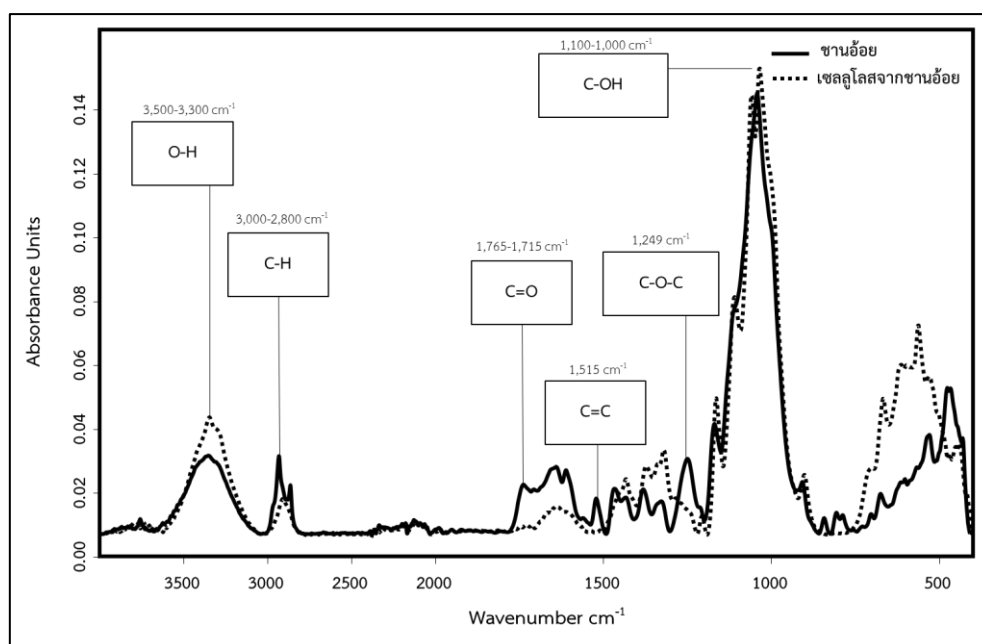
จากรูปที่ 4.1 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างพื้นผิวของตัวอย่างในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการปรับสภาพทางเคมี โดยในรูปที่ 4.1 (A) ตัวอย่างชานอ้อยพบว่ามีลักษณะของเส้นใยที่ยังคงถูกห่อหุ้มด้วยองค์ประกอบทางพอลิเมอร์อื่น ๆ เช่น ลิกนินและเฮมิเซลลูโลส ซึ่งทำให้เกิดลักษณะพื้นผิวที่ไม่เรียบเนื่องจากมีสิ่งเจือปนติดอยู่ อย่างไรก็ตามเมื่อมีการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ตามที่แสดงในรูปที่ 4.1 (B) พบว่าเส้นใยเซลลูโลสมีการกระจายตัวดีขึ้นและมีลักษณะเส้นใยที่แยกตัวจากกันได้อย่างชัดเจน ซึ่งเป็นผลจากการที่โซเดียมไฮดรอกไซด์ สามารถทำลายพันธะระหว่างเซลลูโลสกับเฮมิเซลลูโลสได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้สีของเส้นใยที่เปลี่ยนไปเป็นสีเหลืองและสารละลายที่เหลือมีสีน้ำตาลยังเป็นเครื่องบ่งชี้ว่ามีการกำจัดเฮมิเซลลูโลสและสารประกอบอื่น ๆ ออกจากโครงสร้างเส้นใยได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ กนกวรรณ มหารัชชมงคล (2558) ที่ระบุว่าอุณหภูมิที่สูงช่วยเร่งปฏิกิริยาระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลสและไอออน ในสารละลายต่างส่งผลให้โครงสร้างเฮมิเซลลูโลสถูกทำลายและกำจัดออกไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ ต่อมาการปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีผลต่อการกำจัดลิกนินออก

จากเส้นใยเซลลูโลส ทำให้เส้นใยที่ได้มีสีขาวขึ้นและมีการกระจายตัวดีขึ้น ซึ่งเป็นผลจากกระบวนการออกซิเดชันที่ช่วยสลายพันธะคาร์บอน-ออกซิเจนภายในโครงสร้างลิกนินและช่วยให้เซลลูโลสบริสุทธิ์มากขึ้น หลังจากนั้นจึงทำให้แห้งและนำมาขึ้นรูปเป็นวัสดุดูดซับแอโรเจล พบว่ารูปที่ 4.1 (C) ซึ่งเป็นแอโรเจลจากเซลลูโลสขานอ้อยแสดงโครงสร้างที่มีรูพรุนซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของแอโรเจล เส้นใยเซลลูโลสจัดเรียงตัวแบบสุ่ม ทำให้เกิดช่องว่างและรูพรุนจำนวนมาก ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อคุณสมบัติการดูดซับของแอโรเจล อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการเติมสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ลงในแอโรเจล ตามที่แสดงในรูปที่ 4.1 (D) พบว่ามีอนุภาคของสังกะสีปกคลุมอยู่บริเวณพื้นผิวของแอโรเจลอย่างชัดเจน ซึ่งบ่งชี้ว่าอนุภาคสังกะสีสามารถเคลือบและกระจายตัวอยู่ภายในโครงสร้างแอโรเจลได้เป็นอย่างดีอาจส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสมบัติพื้นผิวและอาจส่งผลต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของวัสดุ นอกจากนี้การมีอนุภาคสังกะสีปกคลุมยังอาจมีผลต่อปฏิกิริยากับสารมลพิษที่ต้องการกำจัด

ดังนั้นผลการวิเคราะห์ภาพ SEM ไม่เพียงแต่ช่วยยืนยันการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างพื้นผิวในแต่ละขั้นตอนของการปรับสภาพเซลลูโลสเท่านั้น แต่ยังช่วยให้เข้าใจถึงผลกระทบของกระบวนการเติมสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ต่อโครงสร้างและสมบัติของแอโรเจล ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการพัฒนาและออกแบบวัสดุที่มีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับการใช้งานในด้านการดูดซับหรือการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีด้วย

#### 4.1.2 เทคนิควิเคราะห์ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FTIR)

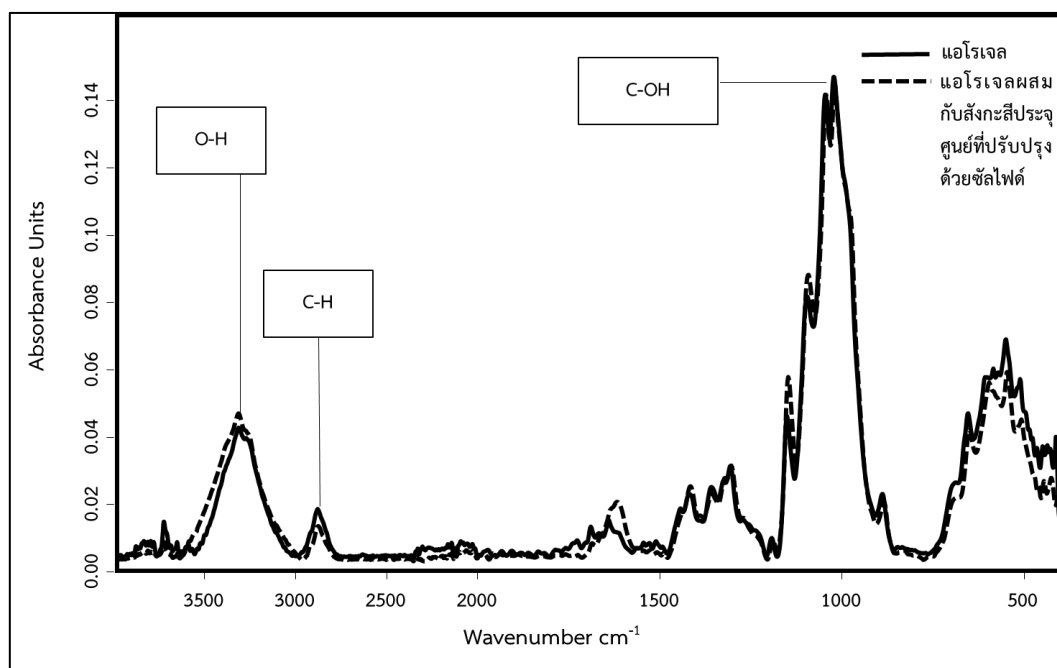
การวิเคราะห์ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับวิเคราะห์และระบุชนิดของสารโดยอาศัยการดูดกลืนแสงอินฟราเรด (IR) ของพันธะเคมีในโมเลกุล เมื่อแสงอินฟราเรดถูกส่งผ่านตัวอย่าง พันธะในโมเลกุลจะเกิดการสั่นสะเทือนในรูปแบบต่าง ๆ ระบุชนิดของโมเลกุลหรือวิเคราะห์องค์ประกอบ แสดงดังรูปที่ 4.2 และ 4.3



รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ FTIR ชานอ้อย และเซลล์ูโลสจากชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพทางเคมี

จากรูปที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างชานอ้อยและเซลล์ูโลสจากชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพทางเคมี โดยสำหรับตัวอย่างชานอ้อยที่พบสัญญาณการดูดกลืนอินฟราเรดที่ช่วงเลขคลื่น 3,300-3,500  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นของพันธะ O-H ในหมู่ไฮดรอกซิลที่พบได้ทั้งในเซลล์ูโลสและลิกนิน แสดงให้เห็นถึงการมีอยู่ขององค์ประกอบพอลิเมอร์ธรรมชาติในตัวอย่าง นอกจากนี้ ยังพบสัญญาณที่ช่วงเลขคลื่น 2,800-3,000  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นการสั่นของพันธะ aliphatic C-H ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของโครงสร้างโมเลกุลที่ประกอบไปด้วยสายโซ่ไฮโดรคาร์บอน นอกจากนี้ การปรากฏของเลขคลื่น 1,765-1,715  $\text{cm}^{-1}$  บ่งชี้ถึงการมีอยู่ของหมู่ฟังก์ชัน C=O ซึ่งเกี่ยวข้องกับโครงสร้างของเซลล์ูโลสและเฮมิเซลล์ูโลส ในขณะที่สัญญาณที่ 1,250  $\text{cm}^{-1}$  สะท้อนถึงหมู่ฟังก์ชัน C-O-C ซึ่งเป็นโครงสร้างที่พบในลิกนิน และช่วงคลื่น 1,100-1,000  $\text{cm}^{-1}$  แสดงถึงการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน C-O-H ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของเซลล์ูโลส อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการปรับสภาพทางเคมีโดยใช้สารละลายไฮโดรอกไซด์ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และกรดซัลฟิวริก พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญในสเปกตรัม FTIR โดยไม่มีการปรากฏของสัญญาณที่เลขคลื่น 1,732  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นค่าลักษณะเฉพาะของหมู่คาร์บอนิล (C=O) ในเฮมิเซลล์ูโลส และไม่มีสัญญาณที่ 1,520  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของพันธะโครงสร้างอะโรมาติกในลิกนิน ส่งผลให้สามารถยืนยันได้ว่ากระบวนการปรับสภาพทางเคมีสามารถกำจัดเฮมิเซลล์ูโลสและลิกนินออกจากเส้นใยชานอ้อยได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างของเส้นใยที่ได้รับการยืนยันจากผลการวิเคราะห์ทางสเปกโทรสโกปี สัญญาณของเซลล์ูโลสยังคงสามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนหลังการปรับสภาพ ซึ่งบ่งชี้ว่ากระบวนการดังกล่าวสามารถคัดแยกเซลล์ูโลสบริสุทธิ์ออกจากชานอ้อยได้โดยไม่ทำให้เกิดการทำลายโครงสร้างของเซลล์ูโลส นอกจากนี้การลดลงของ

สัญญาณที่เกี่ยวข้องกับลิกนินและเฮมิเซลลูโลสยังเป็นเครื่องยืนยันว่ากระบวนการปรับสภาพสามารถช่วยเพิ่มความสามารถของเซลลูโลส ทำให้สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุตั้งต้นที่มีศักยภาพ สำหรับการพัฒนาเป็นวัสดุขั้นสูง เช่น แอโรเจล หรือวัสดุนาโนเซลลูโลส สำหรับการใช้งานในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจากงานวิจัยของ Maduang et al. (2018) ได้ศึกษาผลกระทบของการปรับสภาพเส้นใยและการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณทางเคมีที่เกิดขึ้นในกระบวนการดังกล่าว โดยพบว่าเมื่อเส้นใยได้รับการปรับสภาพแล้วสัญญาณที่เกี่ยวข้องกับเซลลูโลสยังคงมีอยู่ แต่สัญญาณของเฮมิเซลลูโลสและลิกนินกลับลดลงอย่างชัดเจน ซึ่งบ่งชี้ว่าโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสและลิกนินได้รับการทำลายหรือถูกกำจัดออกไปในกระบวนการนี้ การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวสามารถมองเห็นได้จากการที่สัญญาณของหมู่ฟังก์ชัน -OH และ aliphatic-CH ยังคงปรากฏอยู่ ซึ่งเป็นสัญญาณที่บ่งบอกถึงการมีอยู่ของเซลลูโลสในเส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว ในขณะที่สัญญาณของ C=O ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ของเฮมิเซลลูโลส และ C-O-C ซึ่งเป็นสัญญาณของลิกนินลดลง อย่างเด่นชัดหลังการปรับสภาพ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีการกำจัดหรือการลดปริมาณของเฮมิเซลลูโลสและลิกนินออกจากเส้นใยอย่างชัดเจนในกระบวนการนี้ ทั้งนี้การกำจัดเฮมิเซลลูโลสและลิกนินมีความสำคัญในการปรับปรุงคุณสมบัติของเซลลูโลส เช่น การเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานเส้นใยในกระบวนการต่าง ๆ เช่น การผลิตวัสดุชีวภาพหรือเส้นใยที่มีคุณสมบัติเฉพาะที่ดีขึ้น



รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ FTIR ของแอโรเจล และแอโรเจลผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์

จากรูปที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR ซึ่งแสดงถึงลักษณะของตัวอย่างแอโรเจล และตัวอย่างแอโรเจลผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ จากผลการศึกษาของทั้งสองตัวอย่างพบเลขคลื่น ช่วง 3,300-3,500  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งบ่งชี้ถึงการสั่นสะเทือนของพันธะ O-H เป็นลักษณะของหมู่ไฮดรอกซิลที่พบได้ในเซลลูโลสและลิกนิน การสั่นสะเทือนในช่วงนี้สะท้อนถึงหมู่ไฮดรอกซิลเป็นองค์ประกอบสำคัญพบในโครงสร้างพอลิแซ็กคาไรด์ของพืชแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของแอโรเจลยังคงรูปของเซลลูโลสไว้อยู่ นอกจากนี้ยังพบเลขคลื่นช่วง 2,800-3,000  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งการบ่งชี้ถึงการสั่นสะเทือนของพันธะ aliphatic C-H เกี่ยวข้องกับสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่พบในลิกนินและเซลลูโลส แสดงให้เห็นถึงการมีอยู่ของหมู่ฟังก์ชันที่เกี่ยวข้องกับองค์ประกอบของพืชในตัวอย่างแอโรเจล เมื่อผ่านการปรับสภาพทางเคมีแล้ว พบเลขคลื่นช่วง 1,765-1,715  $\text{cm}^{-1}$  เป็นลักษณะเฉพาะของหมู่คาร์บอนิล (C=O) ซึ่งพบในโครงสร้างของเซลลูโลส ซึ่งหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลเซลลูโลสได้เป็นองค์ประกอบสำคัญที่ช่วยเสริมความแข็งแรงให้แก่โครงสร้างของวัสดุ แอโรเจล นอกจากนี้ยังพบเลขคลื่นช่วง 1,100-1,000  $\text{cm}^{-1}$  แสดงถึงการสั่นสะเทือนของพันธะ C-O-H ซึ่งเป็นโครงสร้างของเซลลูโลสแสดงว่าเซลลูโลสยังคงรูปโครงสร้างดั้งเดิมไว้ได้แม้ผ่านกระบวนการสังเคราะห์เป็นแอโรเจลแล้ว เมื่อเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างแอโรเจล และตัวอย่างแอโรเจลที่ผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ พบว่าโครงสร้างพื้นฐานของเซลลูโลสยังคงอยู่ในทั้งสองตัวอย่างซึ่งสอดคล้องกับสเปกตรัม FTIR ของเซลลูโลสจากชานอ้อย ที่ผ่านการปรับสภาพทางเคมีก่อนหน้านี้ อย่างไรก็ตามความเข้มของสัญญาณในบางช่วงคลื่น อาจเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการเติมสังกะสีประจุศูนย์ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ ซึ่งอาจมีปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันในโครงสร้างเซลลูโลสและส่งผลต่อคุณสมบัติของแอโรเจลที่ได้ ทั้งนี้ การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค FTIR ทำให้สามารถสรุปได้ว่าแอโรเจลยังคงรูปโครงสร้างพื้นฐานของเซลลูโลสไว้เหมือนเดิมและสามารถนำไปปรับปรุงเพิ่มเติมเพื่อการใช้งานที่ต้องการสมบัติทางเคมีและทางกายภาพเฉพาะทางต่อไป

#### 4.1.3 เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

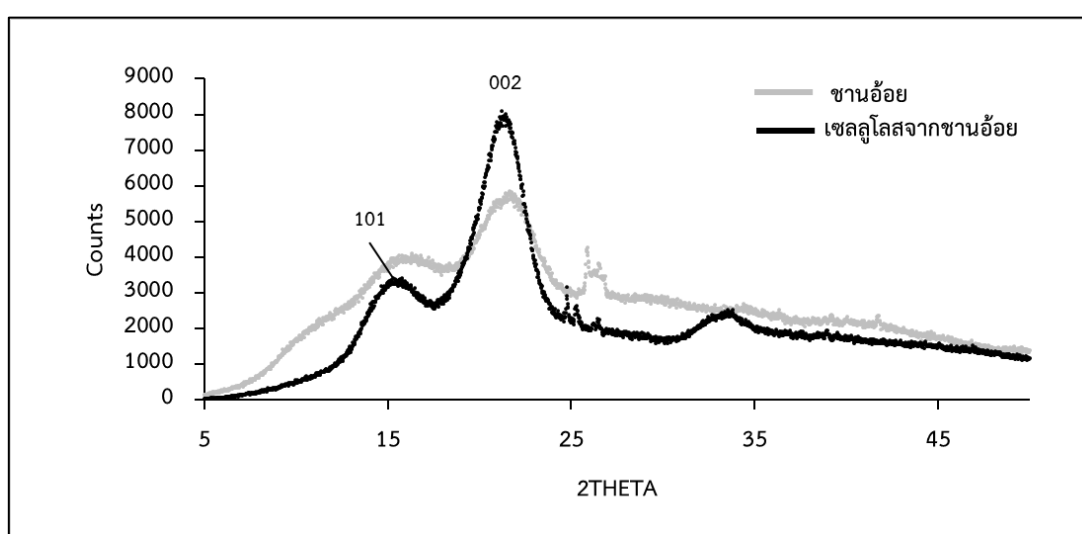
การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เป็นเทคนิคการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกใช้สำหรับศึกษาโครงสร้างผลึกเซลลูโลสของตัวอย่างโดยเฉพาะศึกษาลักษณะสัญญาณวิทยา ซึ่งในงานวิจัยนี้ ทำการศึกษาตัวอย่างชานอ้อยและเซลลูโลสจากชานอ้อยที่การปรับสภาพด้วยไฮเดียมไฮดรอกไซด์และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ การศึกษา XRD เนื่องจากเซลลูโลสมีโครงสร้างเป็นผลึก และเฮมิเซลลูโลสและลิกนินมีลักษณะเป็นอสัณฐาน โดยพีคที่แสดงความเป็นผลึกมีค่า  $2\theta$  ที่  $22^\circ$  หรือระนาบ 002 และพีคอสัณฐานมีค่า  $2\theta$  ที่  $16^\circ$  หรือระนาบ 101 จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่าเมื่อมีการปรับสภาพทางเคมีแล้วพบว่าค่าความเป็นผลึกสูงขึ้นกว่าชานอ้อยที่ยังไม่ผ่านการปรับสภาพ จากผลการวิเคราะห์ XRD สามารถแปลงเป็นค่าดัชนีผลึก (Crystallinity index ; CrI) โดยคำนวณได้จากสมการ 14

$$\text{CrI} (\%) = \frac{I_{002} - I_{101}}{I_{002}} \times 100 \quad (14)$$

โดย  $I_{002}$  คือ ค่าความเข้มสูงสุดที่ระนาบ 002 แสดงถึงส่วนที่เป็นผลึก  
 $I_{101}$  คือ ค่าความเข้มสูงสุดที่ระนาบ 101 แสดงถึงส่วนที่เป็นอสัณฐาน

ตารางที่ 4.1 ค่าดัชนีผลึกของชานอ้อยและเซลลูโลสจากชานอ้อย

เส้นใย	ค่าดัชนีผลึก
ชานอ้อย	42.95
เซลลูโลสจากชานอ้อย	67.41



รูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ XRD ของชานอ้อย (A) และเซลลูโลสจากชานอ้อย (B)

จากรูปที่ 4.4 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีผลึกระหว่างชานอ้อยและเซลลูโลสจากชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพทางเคมี โดยพบว่าค่าดัชนีผลึกของเซลลูโลสที่ผ่านการปรับสภาพทางเคมีมีค่าสูงชันกว่าชานอ้อยอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งบ่งชี้ถึงการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนของเซลลูโลสที่อยู่ในรูปแบบผลึก ซึ่งกระบวนการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มีบทบาทสำคัญในการกำจัดส่วนที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งเป็นองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลสและลิกนินที่แทรกอยู่ในโครงสร้างของชานอ้อย ส่งผลให้สัดส่วนของโครงสร้างผลึกของเซลลูโลสมีความเด่นชัดมากขึ้น (Xu et al., 2015)

นอกจากนี้จากผลการศึกษาสอดคล้องกับงานของ Melesse et al. (2022) พบว่าการใช้สารละลายต่าง เช่น สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ สามารถทำลายพันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมระหว่างโมเลกุลของเซลลูโลสกับองค์ประกอบที่เป็นอสัณฐานอื่น ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพช่วยให้เส้นใยเซลลูโลสมีการจัดเรียงตัวใหม่ในลักษณะที่เป็นระเบียบมากขึ้นส่งผลทำให้ค่าดัชนีผลึกเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งในขณะเดียวกันสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทำหน้าที่เป็นสารออกซิไดซ์ที่สามารถทำลายพันธะ

เชื่อมต่อของเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน ส่งผลให้เกิดการสลายตัวขององค์ประกอบที่ไม่เป็นผลึกและช่วยทำให้โครงสร้างของเซลลูโลสมีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบมากขึ้น ทำให้โครงสร้างผลึกของเซลลูโลสที่เหลืออยู่สามารถตรวจวัดได้ชัดเจนขึ้น จากการวิเคราะห์ XRD การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่ากระบวนการปรับสภาพทางเคมีมีประสิทธิภาพในการเพิ่มความบริสุทธิ์ของเซลลูโลสขานอ้อยและช่วยให้สามารถนำวัสดุนี้ไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมที่ต้องการเซลลูโลสที่มีความเป็นผลึกสูง เช่น การผลิตวัสดุนาโนเซลลูโลสหรือวัสดุเชิงประกอบที่มีสมบัติทางกลที่ดีขึ้น

#### 4.1.4 เทคนิควิเคราะห์พื้นที่ผิวและหาความพรุนของอนุภาค (BET)

การวิเคราะห์พื้นที่ผิวและความพรุนของอนุภาคเป็นเทคนิคที่ใช้ในการประเมินพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) ของวัสดุโดยเฉพาะวัสดุที่มีลักษณะเป็นรูพรุนหรือมีพื้นที่ผิวขนาดใหญ่ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้มีการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวอย่างแอโรเจลและตัวอย่างแอโรเจลผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ แสดงผลดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 พื้นที่ผิวของแอโรเจล และแอโรเจลที่ผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์

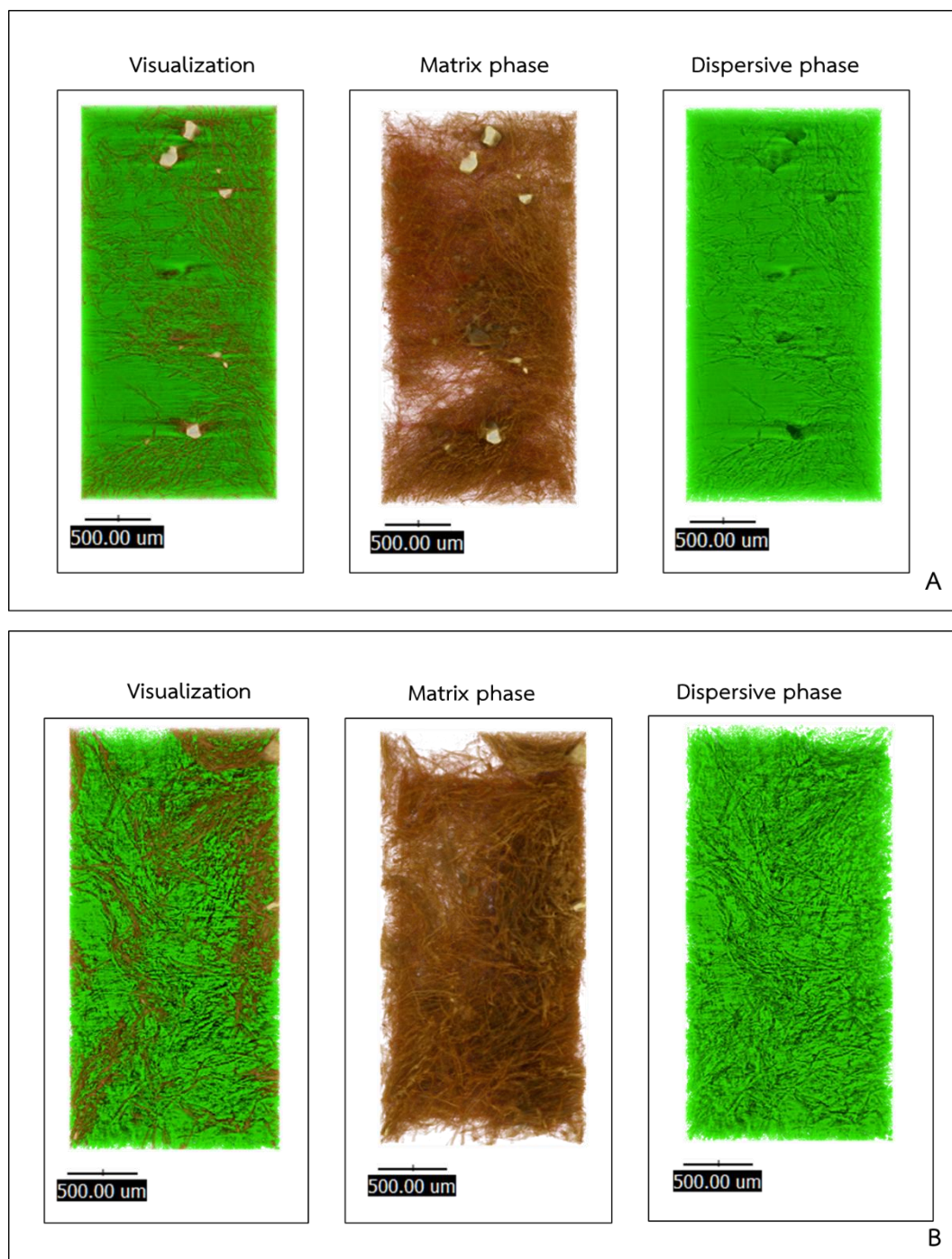
ตัวอย่าง	Single point BET (m <sup>2</sup> /g)	Total pore volume (cc/g)
แอโรเจล	0.7125	0.000267
แอโรเจลผสมสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์	0.4996	0.000141

จากตารางที่ 4.2 แสดงค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวอย่างแอโรเจลซึ่งวิเคราะห์โดยเทคนิค BET พบว่า มีค่า 0.7125 ตารางเมตรต่อกรัม และตัวอย่างแอโรเจลผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ พบว่า มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะลดลงเหลือ 0.4996 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติมอนุภาคสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์อาจมีผลต่อโครงสร้างของแอโรเจลส่งผลให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะลดลง ซึ่งปัจจัยที่อาจเป็นสาเหตุสำคัญ ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างรูพรุนของแอโรเจลระหว่างตัวอย่างที่มีการปรับปรุงโดยนำแอโรเจลผสมสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ ซึ่งมีการเติมสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์อาจส่งผลให้อนุภาคเกิดการจับตัวกันเองหรือสะสมภายในโครงสร้างรูพรุนของแอโรเจลซึ่งสอดคล้องโดยผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่แสดงให้เห็นว่าอนุภาคสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์มีการกระจายตัวภายในโครงสร้างของแอโรเจลและอาจส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะนั้นลดลง นอกจากนี้กระบวนการเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์อาจส่งผลต่อค่าพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเช่นกัน ในการเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ ในครั้งนี้ ผู้วิจัยได้มีการใช้โกรกในการบดตัวอย่างที่ต้องการศึกษา เพื่อให้ได้ตัวอย่างที่มีขนาดเล็กสำหรับนำไปวิเคราะห์ BET โดยตัวอย่างที่ศึกษา ได้แก่ แอโรเจลและแอโรเจลผสมสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ หลังจากการบดแล้วตัวอย่างจะถูกนำไปวิเคราะห์เพื่อหาค่าพื้นที่ผิวจำเพาะโดยใช้เทคนิค BET ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลง

ทางกายภาพของแอโรเจล เช่น การยุบตัวของโครงสร้างรูพรุนหรือการสูญเสียลักษณะเฉพาะของวัสดุ ทั้งนี้การศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของแอโรเจลผสมสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์จะช่วยให้สามารถยืนยันกลไกที่ส่งผลต่อค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น การเติมสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ส่งผลต่อกลไกการกำจัดเมธิลีนโดยเพิ่มประสิทธิภาพในการรีดักชันของสารเมธิลีน อย่างไรก็ตามการปรับปรุงนี้ส่งผลให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของแอโรเจลลดลงเมื่อเทียบกับแอโรเจลที่ไม่ได้เติมสารดังกล่าว ซึ่งอาจเกิดจากการอุดตันของรูพรุนหรือการรวมตัวกันของอนุภาคสังกะสีภายในโครงสร้างวัสดุ โดยผลการศึกษาสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ebrahimi et al. (2020) ซึ่งทำการสังเคราะห์เซลลูโลสแอโรเจลด้วยวิธีทำแห้งด้วยแรงดันแวดล้อม พบว่าค่าพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในระดับต่ำ ประมาณ 5 ตารางเมตรต่อกรัม แม้จะมีการเติมสารสร้างรูพรุนที่ช่วยเพิ่มค่าพื้นที่ผิวจำเพาะดังกล่าวแล้วจากเดิมที่มีเพียง 1.5 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งเพิ่มค่าพื้นที่ผิวจำเพาะได้ถึงสามเท่า ทั้งนี้สาเหตุของค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่ต่ำอาจเนื่องมาจากโครงสร้างของวัสดุที่มีรูพรุนขนาดใหญ่

#### 4.1.5 เทคนิควิเคราะห์ถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์สามมิติระดับจุลภาคด้วยเอกซเรย์ย่านพลังงานสูงจากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอน (XTM)

ถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์สามมิติระดับจุลภาคด้วยเอกซเรย์ย่านพลังงานสูงจากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอนเป็นเทคนิคการวิเคราะห์ที่ใช้การถ่ายภาพเอกซเรย์เพื่อสร้างภาพ 3 มิติของตัวอย่างวัสดุ ซึ่งช่วยให้สามารถศึกษาลักษณะเฉพาะภายในวัสดุได้อย่างละเอียด โดย XTM สามารถให้ข้อมูลที่สำคัญเกี่ยวกับสัณฐานวิทยาภายในวัสดุ ข้อบกพร่องทางวิศวกรรม ความพรุน และการกระจายรูพรุนภายในตัวอย่างได้อย่างชัดเจน การใช้งานเทคนิคนี้จึงเหมาะสมกับการศึกษาวัสดุที่มีโครงสร้างซับซ้อน แสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ XTM ของแโรเจล (A) แโรเจลผสมสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซิลไฟด์ (B)

รูปที่ 4.5 แสดงการวิเคราะห์โครงสร้างภายในของแโรเจลทั้ง 2 ชนิด ได้แก่ แโรเจล (A) และแโรเจลผสมสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซิลไฟด์ (B) โดยภาพจากการวิเคราะห์แบ่งออกเป็น

3 ส่วนหลัก ได้แก่ รูปด้านซ้ายที่แสดงการจำลองโครงสร้าง (Visualization) ซึ่งแบ่งเป็นสององค์ประกอบ ได้แก่ Matrix phase เป็นโครงสร้างของแข็ง และ Dispersive phase เป็นช่องว่างอากาศหรือรูพรุน รูปตรงกลางแสดงเฉพาะ Matrix phase ซึ่งเผยให้เห็นพื้นผิวที่มีรูพรุนกระจายตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ มีขนาดและรูปร่างที่หลากหลาย รวมถึงการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอ ในชั้นประสานผิว ขณะที่รูปด้านขวาแสดง Dispersive phase ซึ่งเป็นตัวแทนของโครงสร้างรูพรุนภายในแอโรเจล พบว่ารูพรุนมีขนาดใหญ่กระจายอยู่ทั่วทั้งวัสดุ โดยมีการเจาะลึกเข้าสู่โครงสร้างภายในแบบไม่เป็นระเบียบและมีระดับความลึกที่แตกต่างกันไป

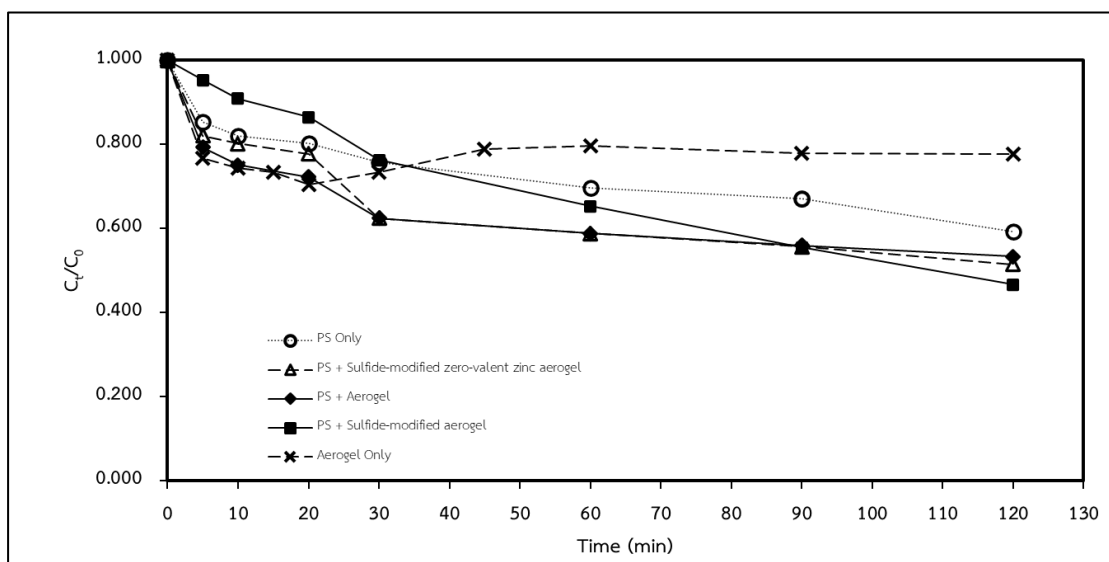
จากรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างที่ชัดเจนในโครงสร้างภายในระหว่างตัวอย่างแอโรเจล (A) และตัวอย่างของแอโรเจลผสมสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ (B) การวิเคราะห์เชิงปริมาณจากเทคนิค XTM พบว่าตัวอย่างแอโรเจลมีค่าความพรุนสูงถึงร้อยละ 88.43 ซึ่งจะทำให้เห็นว่าโครงสร้างของวัสดุมีความโปร่งสูงและมี รูพรุนขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญที่ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวและมีความสามารถในการดูดซับ (Nguyen et al., 2021) อย่างไรก็ตาม ตัวอย่างแอโรเจลผสมสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์พบว่ามีค่าความพรุนลดลงเหลือร้อยละ 70.1 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างของวัสดุที่อาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการใช้งาน การลดลงของค่าความพรุนนี้มีสาเหตุจากการที่อนุภาคสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์มีการกระจายตัวและเกิดการสะสมหรือจับตัวกันภายในช่องว่างของรูพรุน ส่งผลทำให้บางส่วนของรูพรุนถูกอุดปิดกั้นหรือลดขนาดลง (Zhang et al., 2018) นอกจากนี้การเติมอนุภาคนิรย์ลงในเนื้อวัสดุแอโรเจลอาจส่งผลกระทบต่อแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยเซลลูโลสในระหว่างกระบวนการทำแห้ง ทำให้โครงสร้างเกิดการยุบตัวบางส่วนของโครงข่ายพอลิเมอร์ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการลดลงของความพรุนและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางกายภาพของวัสดุ (Ebrahimi et al., 2020)

นอกจากนี้ผลการศึกษานี้ยังมีความสอดคล้องกับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่ลดลงจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET ซึ่งเป็นข้อมูลเพิ่มเติมที่สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างรูพรุนของแอโรเจลผสมสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์มีผลโดยตรงต่อคุณสมบัติของวัสดุ ซึ่งเป็นผลโดยตรงจากการปิดกั้นของรูพรุนและการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างภายในของวัสดุ (Guo et al., 2022) ซึ่งข้อมูลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XTM ช่วยให้สามารถศึกษาลักษณะของโครงสร้างภายในวัสดุได้อย่างละเอียดรวมถึงการเปลี่ยนแปลงของรูพรุนและการจัดเรียงตัวของโครงสร้างในระหว่างกระบวนการปรับปรุงวัสดุ ซึ่งผลการวิเคราะห์สรุปได้ว่าโครงสร้างของแอโรเจลผสมสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์มีการจัดเรียงตัวที่แตกต่างจากแอโรเจล โดยสังเกตเห็นว่าบางส่วนของรูพรุนถูกบล็อกหรือถูกจำกัด ซึ่งเป็นผลมาจากการสะสมของอนุภาคสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ภายในโครงสร้างของแอโรเจล ส่งผลให้ความพรุนลดลงและพื้นที่ผิวจำเพาะลดลงตามไปด้วย

## 4.2 ผลการศึกษาการกำจัดสารเมโรมิส

### 4.2.1 ผลของการศึกษาชนิดของแอโรเจลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมโรมิส

ผลการศึกษาชนิดของแอโรเจลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมโรมิสร่วมกับสารเปอร์ซัลเฟต โดยศึกษาชนิดของวัสดุดูดซับแอโรเจลที่แตกต่างกัน ได้แก่ (1) แอโรเจล (2) แอโรเจลผสมสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ และ (3) แอโรเจลที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ การทดลองดำเนินการภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน โดยมีการศึกษาการกำจัดเมโรมิสทั้งในกรณีที่ใช้แอโรเจลเพียงอย่างเดียว และใช้สารเปอร์ซัลเฟตอย่างเดียว สำหรับเงื่อนไขการศึกษาใช้ความเข้มข้นของสารเมโรมิสเริ่มต้นเท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเร็วรอบในการกวน 150 รอบต่อนาที และค่าความเป็นกรดต่างของสารเมโรมิสเริ่มต้นเท่ากับ 7



รูปที่ 4.6 ผลของการศึกษาชนิดของแอโรเจลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมโรมิส

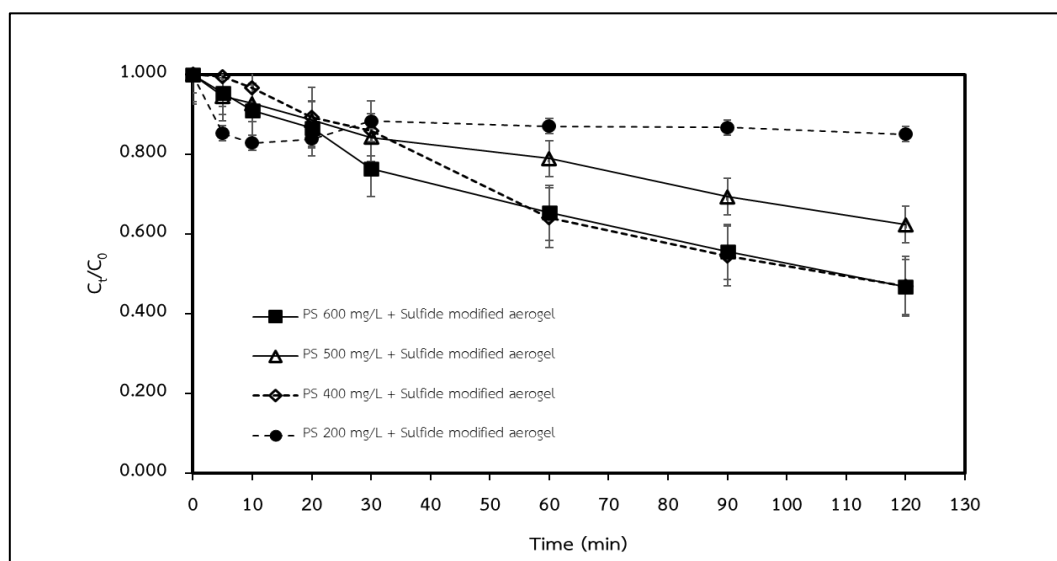
จากการศึกษาชนิดของแอโรเจลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมโรมิส แสดงดังรูปที่ 4.6 พบว่าจากการทดลองมีการใช้วัสดุดูดซับแอโรเจลเพียงอย่างเดียว (Aerogel Only) ในการกำจัดสารเมโรมิสซึ่งผลการศึกษา พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมโรมิสต่ำประมาณร้อยละ 20.4 และมีการใช้สารเปอร์ซัลเฟตอย่างเดียว (PS Only) ในการกำจัดสารเมโรมิสจากการศึกษา พบว่ามีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นมากกว่าการใช้แอโรเจลเพียงอย่างเดียวซึ่งมีประสิทธิภาพประมาณร้อยละ 40.8 ดังนั้น จึงมีการนำวัสดุดูดซับแอโรเจลแต่ละชนิดมาทดสอบการกำจัดสารเมโรมิสร่วมกับสารเปอร์ซัลเฟต ซึ่งประกอบด้วยแอโรเจล ทั้งหมด 3 ชนิด ได้แก่ การใช้แอโรเจลในการกำจัดสารเมโรมิสร่วมกับสารเปอร์ซัลเฟต (PS + Aerogel) การใช้แอโรเจลผสมสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ในการกำจัดสารเมโรมิสร่วมกับสารเปอร์ซัลเฟต (PS + Sulfide-Modified Zero-Valent Zinc Aerogel) และการใช้แอโรเจลที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ในการกำจัดสารเมโรมิสร่วมกับสารเปอร์ซัลเฟต (PS + Sulfide-Modified Aerogel) โดยผลการศึกษาพบว่าการใช้แอโรเจลในการกำจัดสารเมโรมิส

ร่วมกับสารเปอร์ซัลเฟตมีประสิทธิภาพประมาณร้อยละ 46.6 การใช้แอโรเจลผสมสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟต์ในการกำจัดสารเมโรมิลร่วมกับสารเปอร์ซัลเฟตมีประสิทธิภาพประมาณร้อยละ 48.5 และการใช้แอโรเจลที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟต์ในการกำจัดสารเมโรมิลร่วมกับสารเปอร์ซัลเฟตมีประสิทธิภาพสูงสุดถึงร้อยละ 53.3 อย่างไรก็ตามการใช้แอโรเจลที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟต์อาจเพิ่มความสามารถในการกำจัดสารเมโรมิลได้ เนื่องจากซัลไฟต์สามารถทำปฏิกิริยาหรือกระตุ้นสารเปอร์ซัลเฟตทำให้เกิดเป็นอนุมูลอิสระซัลเฟตที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์สูง (Yuan et al., 2015) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์มลพิษ โดยงานวิจัยของ Dong et al. (2019) สอดคล้องกับผลการศึกษาข้างต้น พบว่าซัลไฟต์สามารถช่วยกระตุ้นเปอร์ซัลเฟตได้โดยปรับแต่งพื้นผิวเหล็กประจุศูนย์และเพิ่มการเกิดอนุมูลอิสระส่งผลให้กระบวนการกำจัดซัลฟามาเทนามีประสิทธิภาพมากขึ้น

ดังนั้นในการศึกษาจึงเลือกใช้วัสดุดูดซับแอโรเจลที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟต์เป็นวัสดุหลักในการกำจัดสารเมโรมิลร่วมกับสารเปอร์ซัลเฟตในการศึกษาปัจจัยต่อไป เนื่องจากเป็นวัสดุดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมโรมิลสูงที่สุด และศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ ที่อาจมีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมโรมิลต่อไป

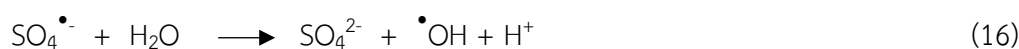
#### 4.2.2 ผลของการศึกษาความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟตต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมโรมิล

ผลการศึกษาความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟตต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมโรมิล โดยศึกษาความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟตทั้งหมด 4 ความเข้มข้น ได้แก่ 200 400 500 และ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร การศึกษาครั้งนี้ใช้วัสดุดูดซับแอโรเจลที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟต์ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของสารเมโรมิลเริ่มต้นเท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเร็วรอบในการกวน 150 รอบต่อนาที และค่าความเป็นกรดต่างของสารเมโรมิลเริ่มต้นเท่ากับ 7



รูปที่ 4.7 ผลของการศึกษาความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟตต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมโรมิล โดยใช้แอโรเจลที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟต์ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

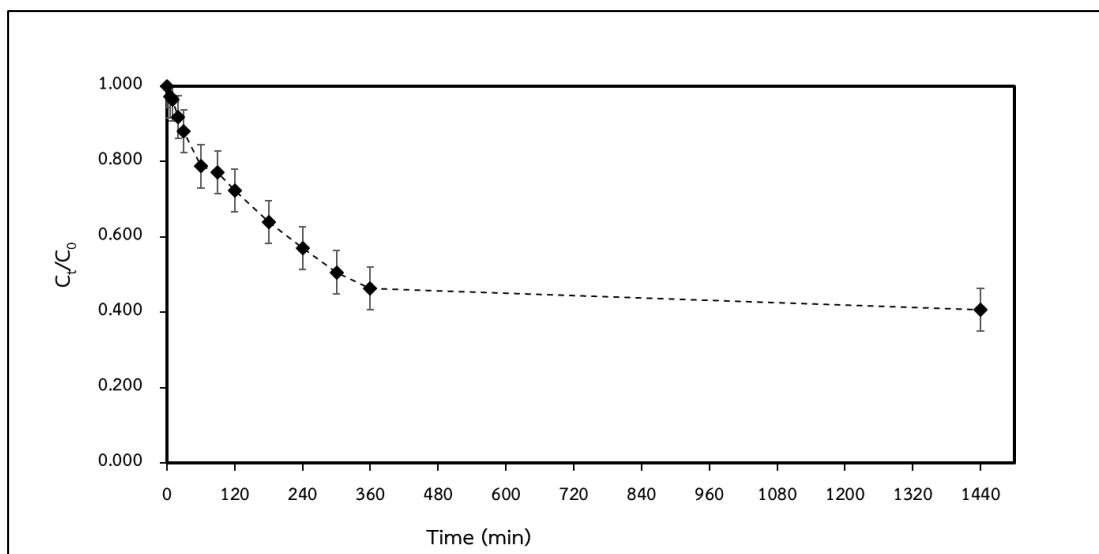
จากผลการศึกษากำจัดสารเมโรไมล์ร่วมกับสารละลายเปอร์ซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ได้แก่ 200 400 500 และ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงดังรูปที่ 4.7 พบว่าการใช้แอรโรเจลที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ร่วมกับสารละลายเปอร์ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพสูงที่สุดถึงร้อยละ 53.1 รองมาที่ความเข้มข้น 600 500 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งการเพิ่มความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟตในกระบวนการออกซิเดชันอาจส่งผลให้ประสิทธิภาพของกระบวนการลดลง เนื่องจากปัจจัยหลายประการที่เกี่ยวข้องกับกลไกการเกิดอนุมูลอิสระและสมดุลของปฏิกิริยา เช่น ในกรณีที่กระบวนการอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น การเพิ่มความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตมากเกินไปอาจส่งผลให้เกิดความไม่สมดุลระหว่างอัตราการสร้างและการใช้อนุมูลอิสระ นอกจากนี้ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตที่สูงเกินอาจยับยั้งการทำงานของอนุมูลอิสระซัลเฟต ( $\text{SO}_4^{\bullet-}$ ) ซึ่งเป็นกระบวนการที่อนุมูลอิสระทำปฏิกิริยากันเอง ส่งผลให้เกิดซัลเฟตไอออน (Yuan et al., 2015) แสดงดังสมการ 15 ถึง 18 เมื่ออนุมูลอิสระซัลเฟตลดลงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมโรไมล์ลดลงด้วย



ดังนั้นในการศึกษาจึงได้เลือกใช้ความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟตที่ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากเป็นสภาวะที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมโรไมล์สูงที่สุด และศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ ที่อาจมีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมโรไมล์ต่อไป

#### 4.2.3 ผลของการศึกษาระยะเวลาการสัมผัสต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมโรไมล์

ผลการศึกษาระยะเวลาการสัมผัสต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมโรไมล์ โดยศึกษาระยะเวลาการสัมผัสตั้งแต่ 0 ถึง 1,440 นาที การศึกษาครั้งนี้ใช้วัสดุดูดซับแอรโรเจลที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของสารเมโรไมล์เริ่มต้นเท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเร็วรอบในการกวน 150 รอบต่อนาที ความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟตเริ่มต้นเท่ากับ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าความเป็นกรดต่างของสารเมโรไมล์เริ่มต้นเท่ากับ 7



รูปที่ 4.8 ผลของการศึกษาระยะเวลาในการสัมผัสต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมไธมิล

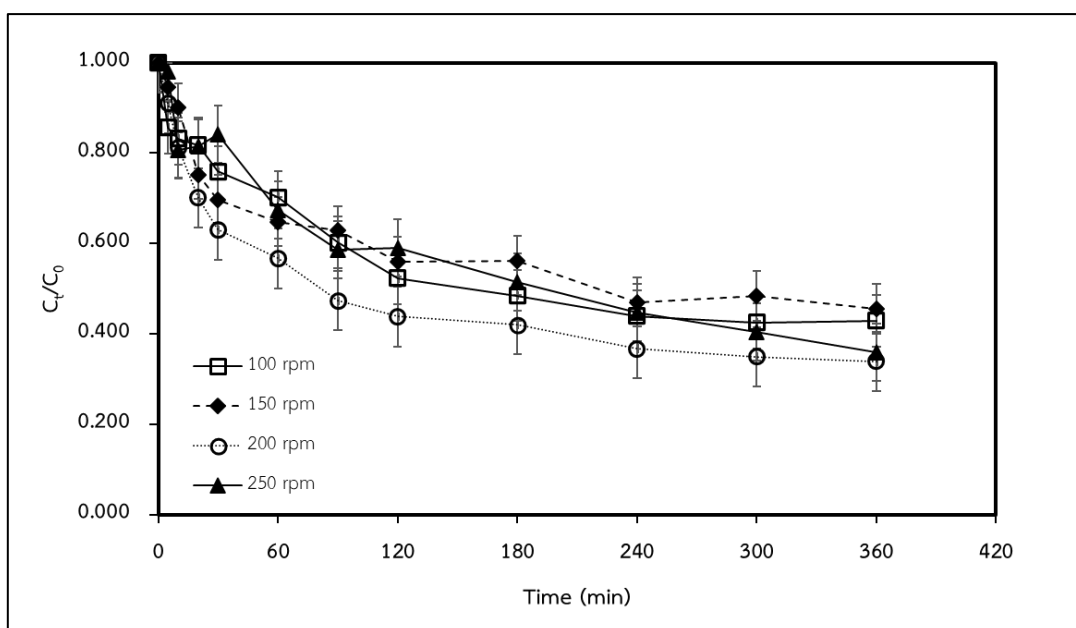
จากผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการกำจัดสารเมไธมิลโดยใช้แอโรเจลที่ปรับปรุงด้วยซิลไฟด์ร่วมกับสารละลายเปอร์ซัลเฟต แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมไธมิล โดยได้ทำการทดลองและเก็บตัวอย่างตามเวลา ได้แก่ 0 ถึง 1,440 นาที เพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพการกำจัดในแต่ละช่วงเวลา

จากผลการศึกษาที่แสดงในรูปที่ 4.8 พบว่าการกำจัดสารเมไธมิลโดยใช้แอโรเจลที่ปรับปรุงด้วยซิลไฟด์ร่วมกับสารละลายเปอร์ซัลเฟตมีแนวโน้มของประสิทธิภาพการกำจัดที่เพิ่มขึ้น จากการทดลองเวลาผ่านไปจะเห็นได้ว่าในช่วงระยะเวลาสัมผัสที่ 360 นาทีแรก เกิดการกำจัดสารเมไธมิลที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดเพิ่มจากร้อยละ 0 เป็นร้อยละ 55 และเมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้นที่ 360 ถึง 1,440 นาที จะเห็นได้ว่ามีค่าประสิทธิภาพในการดูดซับเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่แสดงให้เห็นถึงภาวะสมดุลของระบบ

ดังนั้นในการศึกษานี้จึงเลือกใช้ระยะเวลาสัมผัส 360 นาที เพื่อนำไปใช้ในการศึกษาขั้นต่อไปเนื่องจากเป็นระยะเวลาสัมผัสที่การกำจัดเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุลหรือคงที่

#### 4.2.4 ผลของการศึกษาความเร็วรอบในการกวนต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมไธมิล

ผลการศึกษาความเร็วรอบในการกวนต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมไธมิล โดยศึกษาความเร็วรอบในการกวนทั้งหมด 4 ความเร็วรอบ ได้แก่ 100 150 200 และ 250 รอบต่อนาที การศึกษาครั้งนี้ใช้วัสดุดูดซับแอโรเจลที่ปรับปรุงด้วยซิลไฟด์ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของสารเมไธมิลเริ่มต้นเท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟตเริ่มต้นเท่ากับ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาสัมผัส 360 นาที และค่าความเป็นกรดต่างของสารเมไธมิลเริ่มต้นเท่ากับ 7



รูปที่ 4.9 ผลของการศึกษาผลของความเร็วยรอบในการกวนต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมไธมิล

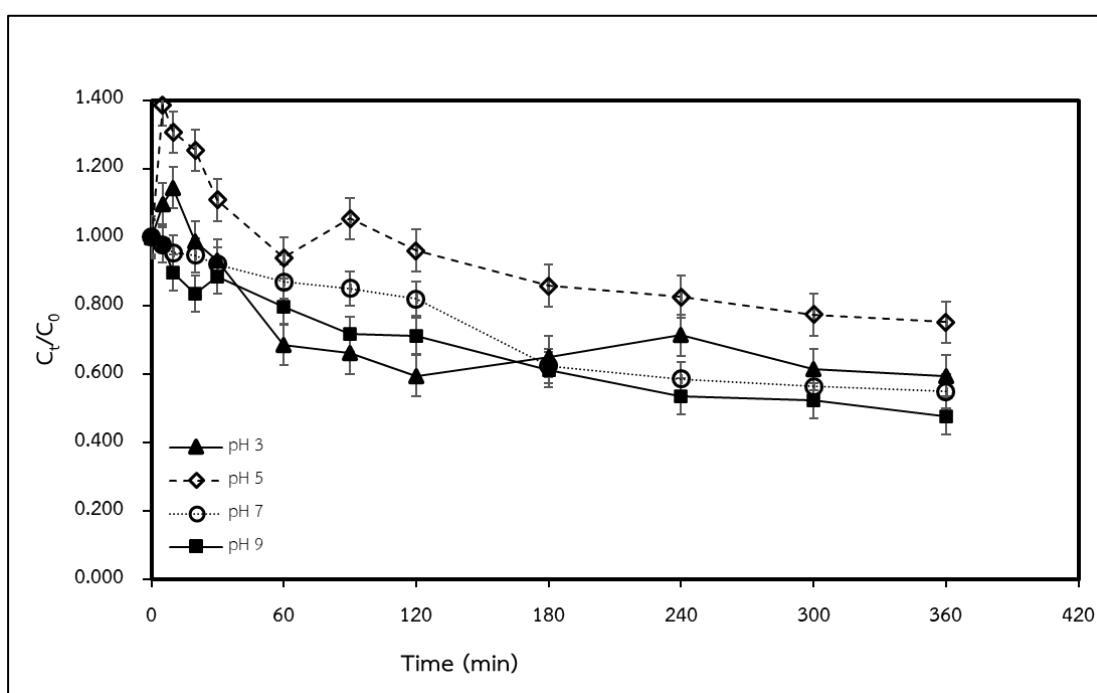
ผลการศึกษาความเร็วยรอบในการกวนต่อการกำจัดสารเมไธมิลโดยใช้แอโรเจลที่ปรับปรุงด้วยซิลไฟด์ร่วมกับสารละลายเปอร์ซัลเฟต เพื่อหาค่าความเร็วยรอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการกำจัดสารเมไธมิล โดยดำเนินการทดลองในความเร็วยรอบที่ 100 150 200 และ 250 รอบต่อนาที

จากผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 4.9 พบว่าความเร็วยรอบในการกวนส่งผลต่ออัตราการกำจัดของสาร เมไธมิล โดยที่ความเร็วยรอบ 200 รอบต่อนาที มีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงที่สุด คิดเป็นร้อยละ 65.1 รองลงมาคือความเร็วยรอบ 250 รอบต่อนาที ซึ่งมีประสิทธิภาพการกำจัดรองลงมาเล็กน้อยคิดเป็นร้อยละ 64 ในขณะที่ความเร็วยรอบ 100 และ 150 รอบต่อนาที มีประสิทธิภาพการกำจัดต่ำกว่าชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วยรอบที่ 200 และ 250 รอบต่อนาที ซึ่งผลการศึกษาก็จะเห็นได้ว่าความเร็วยรอบในการกวนต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมไธมิล พบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วยรอบในการกวนจาก 100 เป็น 200 รอบต่อนาที ประสิทธิภาพในการกำจัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งสามารถอธิบายได้จากการเพิ่มขึ้นของอัตราการถ่ายเทมวลสารระหว่างสารละลายและวัสดุดูดซับรวมถึงการกระจายตัวที่ดีขึ้นของสารออกซิแดนท์หรือสารเร่งปฏิกิริยาในระบบ ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายสารเมไธมิลมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ความเร็วยรอบ 200 รอบต่อนาที อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มความเร็วยรอบเป็น 250 รอบต่อนาที ประสิทธิภาพในการกำจัดกลับลดลงเล็กน้อย ซึ่งอาจเกิดจากการสร้างแรงเฉือนที่มากเกินไป (Hamitouche et al., 2017)

ดังนั้นในการศึกษานี้จึงเลือกใช้ความเร็วยรอบในการกวนที่ 200 รอบต่อนาที เพื่อศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ ที่อาจมีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมไธมิลต่อไป เนื่องจากเป็นความเร็วยรอบที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมไธมิลที่สูงที่สุด

#### 4.2.5 ผลของการศึกษาค่าความเป็นกรดต่างต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมไธมิล

ผลการศึกษาค่าความเป็นกรดต่างต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมไธมิล โดยศึกษาค่าความเป็นกรดต่าง ได้แก่ 3 5 7 และ 9 การศึกษาครั้งนี้ใช้วัสดุดูดซับแอโรเจลที่ปรับปรุงด้วยซิลไฟต์ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของสารเมไธมิลเริ่มต้นเท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟตเริ่มต้นเท่ากับ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาสัมผัส 360 นาที และความเร็วรอบในการกวน 200 รอบต่อนาที



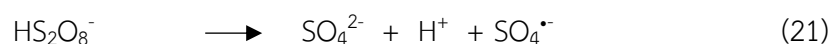
รูปที่ 4.10 ผลของการศึกษาค่าความเป็นกรดต่างต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมไธมิล

จากการศึกษาค่าความเป็นกรดต่างต่อการกำจัดของสารเมไธมิลโดยใช้แอโรเจลที่ปรับปรุงด้วยซิลไฟต์ร่วมกับสารละลายเปอร์ซัลเฟต พบว่าค่าความเป็นกรดต่างมีผลสำคัญต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารเมไธมิล ซึ่งผลการศึกษาแสดงในรูปที่ 4.10 พบว่าค่าความเป็นกรดต่างที่ 9 มีประสิทธิภาพการกำจัดสูงที่สุดถึงร้อยละ 52.3 มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการกำจัดสารเมไธมิล สาเหตุหลักที่ทำให้ค่าความเป็นกรดต่างที่ 9 มีประสิทธิภาพมากกว่าค่าความเป็นกรดต่างอื่น ๆ อาจเกิดจากการกระตุ้นเปอร์ซัลเฟตที่ดีขึ้นในสภาวะต่าง ซึ่งทำให้เกิดอนุมูลอิสระซัลเฟตในปริมาณมาก แสดงดังสมการ 19 อนุมูลอิสระเหล่านี้เป็นสารออกซิแดนท์ที่มีศักยภาพสูงในการทำลายพันธะของเมไธมิล นอกจากนี้ที่ค่าความเป็นกรดต่างสูง อาจมีการเกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลเพิ่มขึ้น



ซึ่งสามารถช่วยเสริมกระบวนการออกซิเดชันให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น การศึกษาก่อนหน้านี้ระบุว่าปฏิกิริยาการกระตุ้นเปอร์ซัลเฟตด้วยที่ค่าความเป็นกรดต่างที่สามารถเพิ่มการสร้างอนุมูลอิสระซัลเฟตได้ดีที่ค่าความเป็นกรดต่างช่วงมากกว่า 7 ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขั้นสูงซึ่งสามารถกำจัดสารอินทรีย์ปนเปื้อนในน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Furman et al., 2010)

อย่างไรก็ตามที่ค่าความเป็นกรดต่างต่ำกว่า 7 ประสิทธิภาพการกำจัดลดลง ซึ่งอาจเป็นเพราะสารเปอร์ซัลเฟตในสถานะที่เป็นกรดมีแนวโน้มที่จะคงอยู่ในรูปที่มีปฏิกิริยาต่ำกว่า ทำให้ไม่สามารถสร้างอนุมูลอิสระได้อย่างมีประสิทธิภาพ แสดงดังสมการ 20 ถึง 21



นอกจากนี้ในสถานะที่เป็นกลาง แสดงดังสมการ 22 ประสิทธิภาพของระบบลดลงเช่นกัน อาจเนื่องมาจากกลไกของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในสถานะกลางมีความสมดุลมากขึ้นระหว่างสารเปอร์ซัลเฟตและอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้น ทำให้ความสามารถในการออกซิไดส์ลดลงเมื่อเทียบกับค่าความเป็นกรดต่างที่ 9



ดังนั้นสรุปได้ว่าค่าความเป็นกรดต่างที่ 9 มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการกระตุ้นเปอร์ซัลเฟตเพื่อนำมาใช้ในการกำจัดเมโรไมด์ เนื่องจากสามารถสร้างอนุมูลอิสระซัลเฟตและอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Xie et al. (2012) พบว่าค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายส่งผลต่อกระบวนการย่อยสลายด้วยเปอร์ซัลเฟต เนื่องจากค่าความเป็นกรดต่างที่แตกต่างกันจะมีผลต่อการเกิดของอนุมูลอิสระ ซึ่งในสถานะกรดอนุมูลอิสระซัลเฟตมีบทบาทสำคัญแม้จะมีศักยภาพรีดอกซ์ต่ำกว่าอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลส่งผลให้อัตราการย่อยสลายในสถานะนี้ค่อนข้างช้า ขณะที่ในสถานะต่างอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลมีบทบาทเด่นชัดกว่าแต่อนุมูลอิสระทั้งสองชนิดอาจสูญเสียประสิทธิภาพในสถานะต่างสูง เนื่องจากทำปฏิกิริยากับไอออนไฮดรอกไซด์อย่างรวดเร็ว

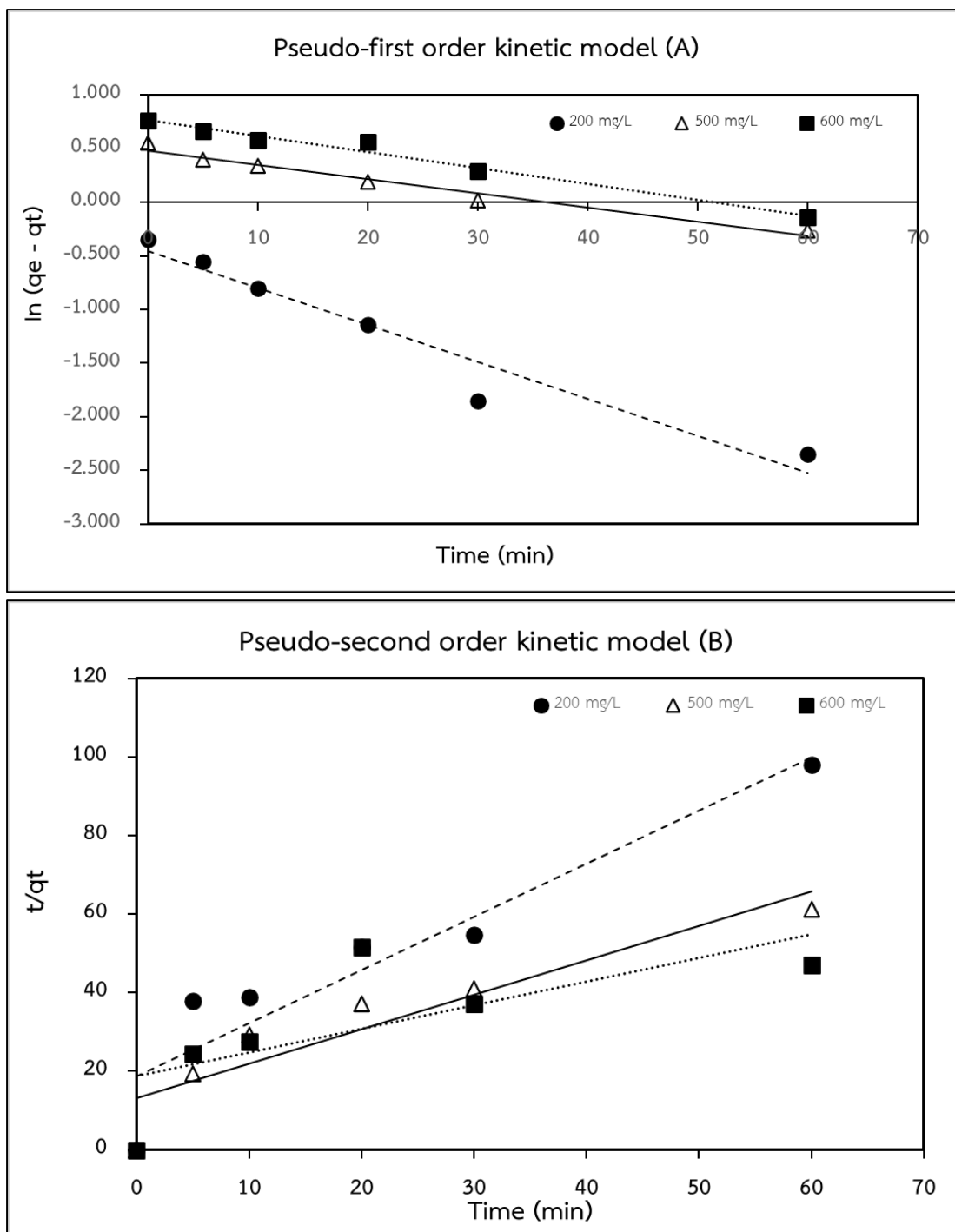
#### 4.2.6 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การกำจัดสารเมโรไมด์ร่วมกับสารเปอร์ซัลเฟต

ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์เกี่ยวกับความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟตต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมโรไมด์ โดยศึกษาที่ความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟต 4 ความเข้มข้น ได้แก่ 200 400 500 และ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้วัสดุชุดขับแอร์เจลที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของสารเมโรไมด์เริ่มต้นเท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเร็วรอบในการกวน 150 รอบต่อนาที และค่าความเป็นกรดต่างเริ่มต้นเท่ากับ 7 เพื่อศึกษาอัตราเร็วของปฏิกิริยาการกำจัดสารเมโรไมด์ร่วมกับสารเปอร์ซัลเฟตด้วยแอร์เจลที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ ในการศึกษาจลนพลศาสตร์ทำการศึกษาแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมและแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม แสดงดังในรูปที่ 4.11

และตารางที่ 4.3 ซึ่งจากรูปที่ 4.11A ใช้แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม เป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\ln(q_e - q_t)$  กับเวลา ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าคงที่  $k_1$  (ต่อนาที) และ  $q_e$  (มิลลิกรัมต่อกรัม) ซึ่งได้ค่าจากจุดตัดแกน  $y$  และความชัน ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ พบว่าค่าความสัมพันธ์ของสมการถดถอยเชิงเส้น (Linear regression correlation,  $R^2$ ) มีค่าเท่ากับ 0.9424 สำหรับความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟต 200 มิลลิกรัมต่อลิตร 0.9504 สำหรับ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร 0.9680 สำหรับ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 0.9774 สำหรับ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งชี้ให้เห็นว่าเมื่อความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟตเพิ่มขึ้น ค่า  $R^2$  มีแนวโน้มเข้าใกล้ 1 มากขึ้น สำหรับรูปที่ 4.11B ใช้แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียมเป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $t/q_t$  กับเวลา ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าคงที่  $k_2$  (กรัมต่อมิลลิกรัม-นาที) และ  $q_e$  (มิลลิกรัมต่อกรัม) จุดตัดแกน  $y$  และความชัน ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ พบว่าค่า  $R^2$  มีค่าเท่ากับ 0.8795 สำหรับความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟต 200 มิลลิกรัมต่อลิตร 0.0556 สำหรับ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร 0.8626 สำหรับ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 0.5059 สำหรับ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.3 เมื่อพิจารณาค่า  $R^2$  ในแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม พบว่าค่า  $R^2$  สำหรับความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟตตั้งแต่ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ขึ้นไปมีค่าใกล้เคียง 1 มากกว่าแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ดังนั้นจากผลการศึกษาข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมให้ค่า  $R^2$  ที่สูงกว่าแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียมในทุกระดับความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟตที่ศึกษาแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมมีความเหมาะสมในการอธิบายกลไกและอัตราการกำจัดสารเมโรไมลที่ใช้แอร์เจลที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ร่วมกับสารเปอร์ซัลเฟตได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าและการเพิ่มความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟตจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่ออัตราการกำจัดเมโรไมลที่ใช้แอร์เจลที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ส่งผลให้ความสามารถในการออกซิไดซ์เมโรไมลเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hao et al. (2020) ที่ได้ศึกษาการกำจัดสารไซโปรฟลอกซาซินโดยใช้กระบวนการออกซิเดชันที่ถูกกระตุ้นด้วยโลหะศูนย์วาเลนซ์และพบว่าการกำจัดเป็นไปตามจลนพลศาสตร์แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม โดยเหล็กประจุศูนย์ร่วมกับสารเปอร์ซัลเฟตมีค่าคงที่อัตราสูงสุดและประสิทธิภาพสูงสุดที่ร้อยละ 84.5 ที่ค่าความเป็นกรดต่างที่ 3 การศึกษาชี้ให้เห็นว่าอนุโมลอิสระซัลเฟตและอนุโมลอิสระไฮดรอกซิลเป็นกลไกหลักในการย่อยสลายสารไซโปรฟลอกซาซินโดยมีปัจจัยสำคัญ เช่น ค่าความเป็นกรดต่าง ปริมาณโลหะ และความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟตที่มีผลต่ออัตราการกำจัด

ตารางที่ 4.3 การศึกษาจลนพลศาสตร์เกี่ยวกับความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟตต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมโรไมล

ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	แบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม			แบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม		
	$k_1$ (ต่อนาที)	$q_e$ (มิลลิกรัม ต่อกรัม)	$R^2$	$k_2$ (กรัมต่อ มิลลิกรัม-นาที)	$q_t$ (มิลลิกรัม ต่อกรัม)	$R^2$
200	0.0345	0.6335	0.9424	0.0985	0.6010	0.8795
500	0.0132	1.6200	0.9680	0.0586	1.1400	0.8626
600	0.0148	2.1400	0.9774	0.2180	1.6600	0.5059



รูปที่ 4.11 การศึกษาจลนพลศาสตร์สำหรับการศึกษาความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟต ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมโรนิน Pseudo-first order (A) Pseudo-second-order (B)

#### 4.2.7 กลไกของการเกิดปฏิกิริยาของการกำจัดสารเมโรมิลในการศึกษา

ในการศึกษานี้ ได้ทำการสังเคราะห์วัสดุดูดซับแอโรเจลที่ผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ และปรับปรุงด้วยซิลไฟต์เพื่อนำมาใช้ในการกำจัดสารเมโรมิล อย่างไรก็ตามผลการศึกษาเบื้องต้นแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของวัสดุดูดซับดังกล่าวยังอยู่ในระดับต่ำ อาจเกิดจากข้อจำกัดของกลไกการดูดซับเพียงอย่างเดียวที่ไม่เพียงพอต่อการกำจัดสารเมโรมิลอย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาต่อเนื่องเกี่ยวกับชนิดของแอโรเจลที่สามารถใช้ร่วมกับสารเปอร์ซัลเฟตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมโรมิล โดยทำการเปรียบเทียบระหว่าง 3 ชนิดของแอโรเจล ได้แก่ (1) การกำจัดเมโรมิลร่วมกับเปอร์ซัลเฟตโดยใช้แอโรเจลเพียงอย่างเดียว (2) การกำจัดเมโรมิลไม่ร่วมกับสารเปอร์ซัลเฟตโดยใช้แอโรเจลที่ผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ปรับปรุงด้วยซิลไฟต์ และ (3) การกำจัดเมโรมิลร่วมกับเปอร์ซัลเฟตโดยใช้แอโรเจลที่ปรับปรุงด้วยซิลไฟต์ ซึ่งจากผลการศึกษา พบว่ากลไกการกำจัดเมโรมิลในแต่ละชนิดของแอโรเจลแตกต่างกัน โดยในกรณีของการใช้แอโรเจลเพียงอย่างเดียว กระบวนการหลักที่เกี่ยวข้องประกอบด้วย กลไกการดูดซับ (Adsorption) ซึ่งอาศัยแรงระหว่างโมเลกุลและคุณสมบัติของพื้นผิววัสดุ (Dai et al., 2022) อย่างไรก็ตามกลไกนี้มีข้อจำกัดด้านความสามารถในการกำจัดสารเมโรมิลทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดต่ำ การเติมสังกะสีประจุศูนย์ลงในแอโรเจลช่วยเพิ่มกลไกการรีดักชันในกระบวนการกำจัดมลพิษได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Salter-Blanc et al., 2011) เนื่องจากสังกะสีประจุศูนย์สามารถให้อิเล็กตรอนให้กับสารเมโรมิล ส่งผลให้โมเลกุลของสารเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีและลดความเป็นพิษลง อย่างไรก็ตามกระบวนการนี้อาจถูกจำกัดโดยอัตราการถ่ายโอนอิเล็กตรอนและการออกซิเดชันของสังกะสีที่อาจเกิดขึ้นได้ง่ายในสารละลาย นอกจากนี้กรณีที่ 1 และ 3 เมื่อเติมสารเปอร์ซัลเฟตลงในระบบ พบว่ากลไกการออกซิเดชันขั้นสูงถูกกระตุ้นผ่านการสร้างอนุมูลอิสระซัลเฟตและอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล นอกจากนี้งานวิจัยของ Urán-Duque et al. (2021) กล่าวว่ากระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงที่อาศัยอนุมูลอิสระซัลเฟตมีศักยภาพสูงในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนด้วยสารอินทรีย์ ดังนั้นสารเปอร์ซัลเฟตจึงสามารถย่อยสลายสารเมโรมิลผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ทำให้การกำจัดเมโรมิลมีประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้แอโรเจลเพียงอย่างเดียว อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของแต่ละกลไกยังขึ้นอยู่กับปัจจัยแวดล้อม เช่น ค่าความเป็นกรดต่าง ความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟตและอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างองค์ประกอบในระบบ ดังนั้นการศึกษานี้จึงเน้นให้เห็นถึงความสำคัญของการใช้วัสดุดูดซับร่วมกับกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง เพื่อเพิ่มศักยภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

##### 4.2.7.1 กลไกที่เกิดขึ้นกับวัสดุดูดซับแอโรเจล (Adsorption Mechanism of Aerogel)

จากผลการศึกษา พบว่าการกำจัดสารเมโรมิลโดยใช้แอโรเจลเป็นวัสดุดูดซับเพียงอย่างเดียวมีประสิทธิภาพต่ำ โดยสามารถกำจัดสารเมโรมิลได้เพียงประมาณร้อยละ 20 ซึ่งอาจเกิดจากข้อจำกัดของวัสดุในด้านโครงสร้างพื้นผิวและกลไกการดูดซับที่ไม่เพียงพอ แม้ว่าแอโรเจลจะมีโครงสร้างรูพรุนสูงและพื้นที่ผิวจำเพาะขนาดใหญ่ ซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับสารปนเปื้อนผ่านกลไกการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี แต่พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดยังคงอยู่ในระดับต่ำ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่แรงแวนเดอร์วาลส์และพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นระหว่างสารเมโรมิลและแอโรเจลไม่สามารถดึงโมเลกุลของสารปนเปื้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพเพียงพอ นอกจากนี้

ขนาดและโครงสร้างของรูพรุนอาจไม่เหมาะสมต่อการกักเก็บโมเลกุลของสารเมโรมิล หรืออาจมีการอุดตันของรูพรุนที่จำกัดการแพร่ของสารเข้าสู่ภายในโครงสร้างส่งผลให้กลไกการดูดซับไม่สามารถทำงานได้เต็มที่

#### 4.2.7.2 กลไกที่เกิดขึ้นกับการกำจัดเมโรมิลโดยใช้แอโรเจลผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์

จากผลการศึกษาพบว่า การกำจัดเมโรมิลโดยใช้แอโรเจลผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งสามารถอธิบายได้จากกลไกการดูดซับทางกายภาพและกลไกการรีดักชันที่เกิดขึ้น โดยสังกะสีประจุศูนย์ทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ ที่สามารถให้อิเล็กตรอนแก่โมเลกุลของเมโรมิล ส่งผลให้โครงสร้างของเมโรมิลเปลี่ยนแปลงและถูกย่อยสลายไปพร้อมกับการเกิดสังกะสีไอออนในสารละลาย ดังแสดงในสมการ 25 ถึง 27

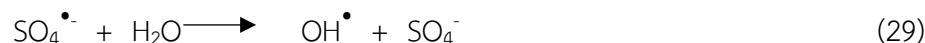
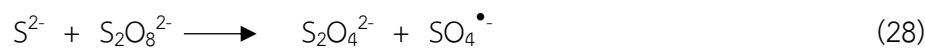


จากสมการที่ 25 สังกะสีประจุศูนย์จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและปล่อยอิเล็กตรอนออกมา ซึ่งอิเล็กตรอนเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของสารเมโรมิล (RX) ร่วมกับโปรตอน ( $\text{H}^+$ ) ส่งผลให้พันธะภายในโมเลกุลอ่อนแอลงและเกิดการแตกตัว กลายเป็นผลิตภัณฑ์รีดิวซ์ที่มีความเป็นพิษลดลงหรือสามารถย่อยสลายได้ง่ายขึ้น ดังแสดงในสมการที่ 26 โดยภาพรวมสังกะสีประจุศูนย์จะทำปฏิกิริยากับเมโรมิลและโปรตอนพร้อมกันกลายเป็นสังกะสีไอออน สารเมโรมิล และ  $\text{X}^-$  ตามสมการที่ 27 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสังกะสีประจุศูนย์เป็นองค์ประกอบสำคัญที่ช่วยให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเมโรมิลผ่านกระบวนการถ่ายโอนอิเล็กตรอน ซึ่งเป็นพื้นฐานของปฏิกิริยารีดักชันในระบบนี้ กลไกที่ได้สามารถอธิบายได้ในงานวิจัยของ Choi and Kim (2009) ศึกษาเกี่ยวกับการรีดักชันของ 2,4,6-ไตรคลอโรฟีนอลโดยใช้สังกะสีประจุศูนย์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นแหล่งให้อิเล็กตรอนแก่สารมลพิษ โดยสังกะสีประจุศูนย์จะปล่อยอิเล็กตรอนและทำปฏิกิริยากับ 2,4,6-ไตรคลอโรฟีนอล ส่งผลให้เกิดการลดประจุของโมเลกุลและการแทนที่กลุ่มคลอรีนออกจากโครงสร้าง ซึ่งเป็นลักษณะเดียวกันกับกลไกการรีดักชันของเมโรมิลในงานวิจัยนี้

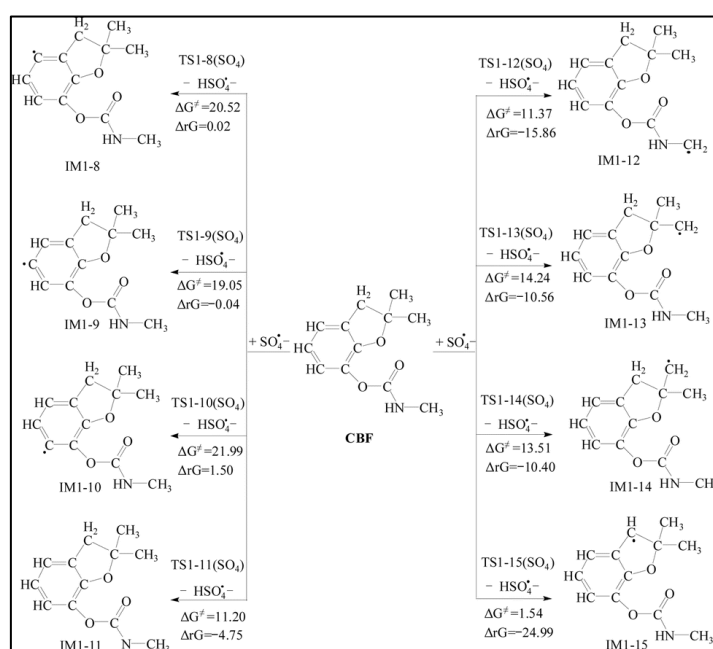
#### 4.2.7.3 กลไกที่เกิดขึ้นกับการกำจัดเมโรมิลร่วมกับเปอร์ซัลเฟตโดยใช้แอโรเจลที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์

จากผลการทดลอง พบว่าการกำจัดเมโรมิลร่วมกับเปอร์ซัลเฟตโดยใช้แอโรเจลที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์มีประสิทธิภาพสูงขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้แอโรเจลเพียงอย่างเดียว ซึ่งเป็นผลมาจากกลไกการกำจัดที่ทำงานร่วมกันหลายกระบวนการ กลไกแรกคือการดูดซับทางกายภาพและทางเคมีของแอโรเจลซึ่งช่วยตรึงโมเลกุลของเมโรมิลไว้บนพื้นผิวของวัสดุ ทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ถัดมาคือกลไกการออกซิเดชันขั้นสูงที่เกิดจากการกระตุ้นสารเปอร์ซัลเฟตให้สลายตัวเป็นอนุมูลอิสระที่มีพลังงานสูง ได้แก่ อนุมูลอิสระซัลเฟต

และอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลซึ่งสามารถเข้าทำลายพันธะทางเคมีของสารเมโรมิลได้อย่างมีประสิทธิภาพ แสดงดังสมการ 28 ถึง 29

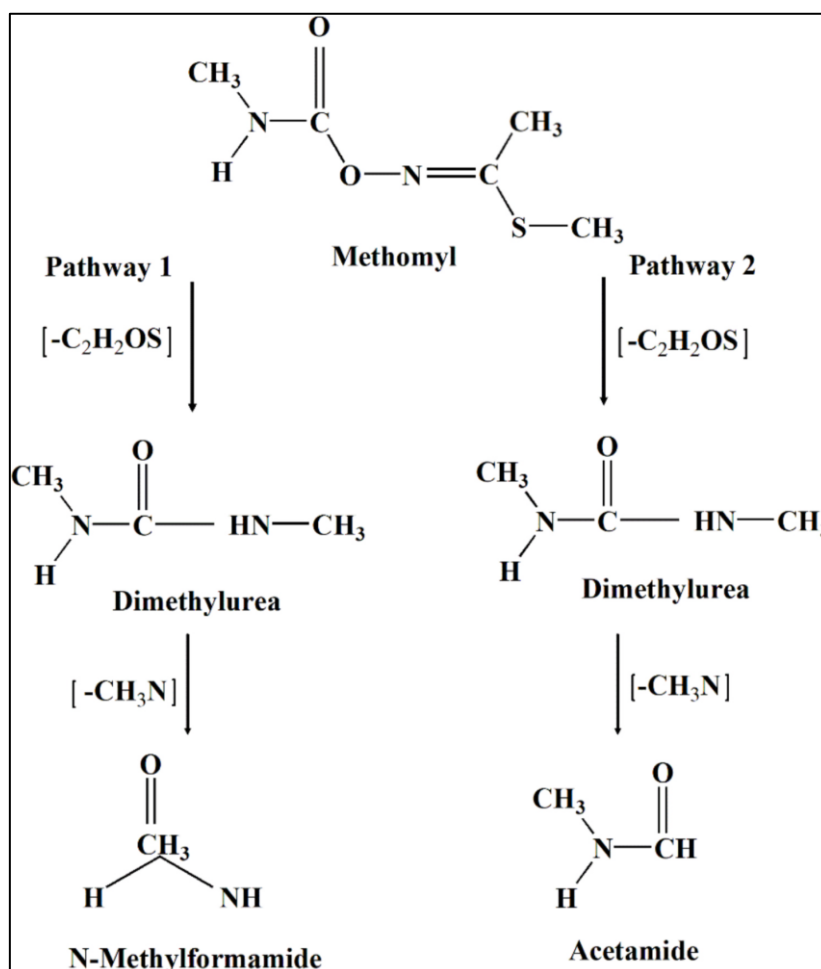


โดยบทบาทของซัลไฟด์ที่ปรับปรุงบนพื้นผิวของแอโรเจลช่วยเร่งการกระตุ้นเปอร์ซัลเฟตให้เกิดอนุมูลอิสระซัลเฟตได้เร็วขึ้นซึ่งมีศักยภาพสูงในการออกซิไดส์สารอินทรีย์ และอนุมูลอิสระซัลเฟตสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำหรือไฮดรอกไซด์ไอออนเพื่อสร้างอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล อย่างไรก็ตามอนุมูลอิสระซัลเฟตและอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของสารเมโรมิล จากงานวิจัยของ Zhang et al. (2024) ศึกษาการย่อยสลายสารคาร์โบฟูราน (Carbofuran) ซึ่งเป็นสารกำจัดศัตรูพืชในกลุ่มคาร์บาเมตโดยใช้กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงด้วยสารเปอร์ซัลเฟต ซึ่งผลการศึกษา พบว่าอนุมูลอิสระซัลเฟตสามารถย่อยสลายคาร์โบฟูรานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เกิดผ่านการดึงอะตอมไฮโดรเจน (H-abstraction) และการสร้างพันธะใหม่ แสดงดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 กลไกการออกซิเดชันของคาร์โบฟูราน (CBF) ด้วยอนุมูลอิสระซัลเฟต (Zhang et al., 2024)

กระบวนการย่อยสลายเมโธมิลอาจก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่หลากหลาย เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างอนุมูลออกซิเจนชนิดปฏิกิริยาสูง (Reactive Oxygen Species, ROS) กับสารมลพิษ เป็นกระบวนการทางเคมีที่ ROS ทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์หรืออนินทรีย์ ในสิ่งแวดล้อม ส่งผลให้เกิดการย่อยสลายของสารมลพิษ โดย ROS ที่สำคัญ ได้แก่ อนุมูลอิสระไฮดรอกซิล มีศักยภาพสูงในการออกซิไดซ์สารมลพิษเปอร์ออกไซด์ซัลเฟต สามารถสร้างอนุมูลอิสระซัลเฟตมีพลัง ในการออกซิไดซ์สูง เป็นต้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Hayat et al. (2021) ศึกษาเกี่ยวกับกลไกการสลายตัวของเมโธมิลในน้ำโดยใช้เปอร์ออกซีโมนโซลเฟต (PMS) ซึ่งเป็นกระบวนการ ออกซิเดชันขั้นสูง (AOPs) ที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารปนเปื้อนในน้ำ พบว่าการเปลี่ยนแปลง ของเมโธมิลไปเป็นแร่ธาตุเกิดขึ้นช้ากว่าและในปริมาณที่ต่ำซึ่งบ่งชี้ว่าเมโธมิลไม่ได้ย่อยสลายไป เป็นแร่ธาตุโดยตรง แต่จะเกิดเป็นสารตัวกลางก่อนการวิเคราะห์ด้วย HPLC-MS ซึ่งพบว่าสารตัวกลาง หลักที่เกิดขึ้นมี 3 ชนิด ได้แก่ ไตเมทิลยูเรีย ( $C_3H_8N_2O$ ) เอ็น-เมทิลฟอร์มามาไมด์ ( $C_2H_5NO$ ) และ อะเซตาไมด์ ( $C_2H_5NO$ ) แสดงดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 การย่อยสลายของสารเมโธมิลโดยใช้ ระบบ PMS-Only (Hayat et al., 2021)

นอกจากสารตัวกลางหลักแล้วยังพบผลิตภัณฑ์จากการย่อยสลายอื่น ๆ ได้แก่ กรดมีเทนซัลฟินิก ( $\text{CH}_4\text{O}_2\text{S}$ ) (เมทิลไทโอ) อะเซตาไมด์ ( $\text{C}_3\text{H}_7\text{NOS}$ ) เมโรมิลซัลฟอกไซด์ ( $\text{C}_5\text{H}_{10}\text{N}_2\text{O}_3\text{S}$ ) โฟ-มอร์โพลีนคาร์โบไทโอเอไมด์ ( $\text{C}_5\text{H}_{10}\text{N}_2\text{OS}$ ) และ วัน-เมทิลเอ็นไฮดรอกซีเมทิลคาร์บามอยล์ออกซีเอทานิโดไทโอเอต ( $\text{C}_5\text{H}_{10}\text{N}_2\text{O}_5\text{S}$ ) ซึ่งจากวิจัยนี้สอดคล้องกับงานของ S. Raut-Jadhav et al. (2016) ได้ศึกษาการเร่งการสลายตัวของเมโรมิล ซึ่งเป็นสารกำจัดศัตรูพืชกลุ่มคาร์บาเมต โดยใช้อัลตราโซนิกคาเวชัน (Ultrasonic Cavitation, UC) ร่วมกับสารเพิ่มประสิทธิภาพปฏิกิริยา (Process Intensifying Additives) พบว่าเมโรมิลซัลฟอกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์จากกระบวนการย่อยสลายด้วยกระบวนการเพนตัน (Fenton) และกระบวนการโอโซน (Ozone) นอกจากนี้งานวิจัยของ M. Tamimi et al. (2006) เป็นการศึกษาการสลายตัวของเมโรมิลด้วยกระบวนการโฟโตแคทาไลติก และได้กำหนดเส้นทางปฏิกิริยาพร้อมทั้งระบุผลิตภัณฑ์ตัวกลางที่เกิดขึ้น พบว่าเมโรมิลซัลฟอกไซด์เกิดขึ้นหลังจากการสลายตัวของเมโรมิลด้วยกระบวนการโฟโตแคทาไลติก (Photocatalytic) อีกทั้งยังระบุว่า วัน-เมทิลเอ็นไฮดรอกซีเมทิลคาร์บามอยล์ออกซีเอทานิโดไทโอเอตเป็นผลิตภัณฑ์รอง เนื่องจากพบกรดมีเทนซัลฟินิกอยู่ในสารละลายปฏิกิริยา ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมีบทบาทในการศึกษากระบวนการทางเคมีและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้กระบวนการเหล่านี้เป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการจัดการสารกำจัดศัตรูพืชที่ยั่งยืนและมีประสิทธิภาพ