

การบำบัดเมโรมิลด้วยแโรเจลผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์



นางสาวปริยาพร สีชุมเหล็ก

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมระบบอุตสาหกรรมและสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2567

METHOMYL TREATMENT WITH AEROGEL MIXED WITH SULFIDE-
MODIFIED ZERO-VALENT ZINC (Zn⁰)



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

การบำบัดเมโรมิลด้วยแอรเจลผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



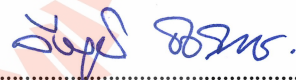
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย วิจิตรเสถียร)
ประธานกรรมการ



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิชน วิชเรนทร์วงศ์)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(รองศาสตราจารย์ ดร.ชนัดถ์ โชคเจริญรัตน์)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม)



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรุद्धิ ชัยวัฒน์)
กรรมการ



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรรธพล มณีแดง)
กรรมการ



(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รองศาสตราจารย์ ดร.พรศิริ จงกล)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ปริยาพร สีขุมเหล็ก : การบำบัดเมธิลด้วยแอโรเจลผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ (METHOMYL TREATMENT WITH AEROGEL MIXED WITH SULFIDE-MODIFIED ZERO-VALENT ZINC (Zn⁰))

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิชน วัชรนทร์วงศ์, 111 หน้า.

คำสำคัญ : เมธิล/แอโรเจล/เซลลูโลส/สังกะสีประจุศูนย์

ปัจจุบันภาคเกษตรกรรมมีการใช้สารเคมีกำจัดศัตรูพืชอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะสารเมธิล ซึ่งเป็นสารในกลุ่มคาร์บาเมตที่มีความเป็นพิษสูง การใช้สารดังกล่าวอย่างต่อเนื่องและในปริมาณมาก ส่งผลให้เกิดการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะในแหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศ และสุขภาพของสิ่งมีชีวิต เนื่องจากสารเมธิลสามารถก่อให้เกิดพิษเฉียบพลันต่อระบบประสาทและมีความคงทนต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแอโรเจลจากเซลลูโลสของชานอ้อย ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรโดยผ่านกระบวนการปรับสภาพทางเคมี เพื่อลดปริมาณลิกนินและเฮมิเซลลูโลสก่อนนำไปสังเคราะห์เป็นแอโรเจลด้วยวิธีการทำแห้งด้วยแรงดันแวดล้อม จากนั้นปรับปรุงคุณสมบัติของแอโรเจลด้วยการผสมสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดเมธิลจากน้ำ โดยวิเคราะห์คุณลักษณะของแอโรเจลด้วยเทคนิคต่าง ๆ ได้แก่ SEM FTIR XRD BET และ XTM ในการศึกษานี้ได้พิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสาร เมธิลร่วมกับสารเปอร์ซัลเฟต ได้แก่ การศึกษาความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต ระยะเวลาสัมผัส ความเร็วในการกวน และค่าความเป็นกรดต่างที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารเมธิล จากการศึกษาชนิดของแอโรเจล 3 ชนิดเปรียบเทียบกัน ได้แก่ แอโรเจล แอโรเจลผสมสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ และแอโรเจลที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ พบว่าแอโรเจลที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ เมื่อนำมาใช้ร่วมกับสารเปอร์ซัลเฟตมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมธิลสูงกว่าแอโรเจลและแอโรเจลผสมสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมธิลร้อยละ 53.3 ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสม ได้แก่ ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาสัมผัส 360 นาที ความเร็วในการกวน 200 รอบต่อนาที และค่าความเป็นกรดต่างที่ 9 ทั้งนี้ทำการศึกษา จลนพลศาสตร์ของกระบวนการกำจัดเมธิลซึ่งสอดคล้องกับแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม แสดงให้เห็นถึงความเหมาะสมของวัสดุที่พัฒนาขึ้นในการกำจัดสารเมธิล ดังนั้นผลการศึกษาวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่า แอโรเจลที่สังเคราะห์จากเซลลูโลสชานอ้อยซึ่งผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยซัลไฟด์ มีศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุสำหรับกำจัดสารมลพิษในน้ำได้

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2567

ลายมือชื่อนักศึกษา.....ปริยาพร

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....อ.อภิชน

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา (ร่วม).....อ.อภิชน

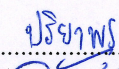
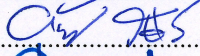
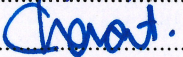
PARIYAPORN SEEKHUMLEK : METHOMYL TREATMENT WITH AEROGEL MIXED WITH SULFIDE-MODIFIED ZERO-VALENT ZINC (Zn⁰).

THESIS ADVISOR : ASST.PROF. APICHON WATCHARENWONG, Ph.D., 111 PP.

Keyword : Methomyl/Aerogel/Cellulose/Zero-valent zinc

Currently, the agricultural sector widely uses pesticides, especially methomyl, a highly toxic carbamate. The continuous and large-scale use of this substance has resulted in environmental contamination, especially in natural water sources, which may affect the ecosystem and the health of living things. This is because methomyl can cause acute neurotoxicity and is resistant to biodegradation. This research aims to develop an aerogel from bagasse cellulose, an agricultural waste material, by undergoing a chemical pretreatment process to reduce the amount of lignin and hemicellulose before synthesizing it into an aerogel by ambient pressure drying. Subsequently, the properties of the aerogel were enhanced by incorporating sulfide-modified zero-valent zinc to improve its efficiency in methomyl removal from aqueous solutions. The characteristics of the aerogels were analyzed using various techniques SEM FTIR XRD BET and XTM. This study investigated factors influencing the removal efficiency of methomyl in the presence of persulfate, including persulfate concentration, contact time, stirring speed, and solution pH. Three aerogel types were studied comparatively: unmodified aerogel, sulfide-modified zero-valent zinc aerogel, and sulfide-modified aerogel. Among these, the sulfide-modified aerogel used in conjunction with persulfate demonstrated the highest methomyl removal efficiency. Under optimal conditions of 400 mg/L persulfate concentration, 360 minutes of contact time, a stirring speed of 200 rpm, and pH 9 this system achieved a methomyl removal efficiency of 53.3%. The kinetics of the methomyl removal process were studied, which was consistent with the pseudo-first-order reaction model, indicating the suitability of the developed material for the removal of methomyl in water sources. Therefore, the findings of this study suggest that the sulfide-modified aerogel synthesized from sugarcane bagasse cellulose possesses strong potential for application as material for the removal of pollutants from aqueous environments.

School of Environmental Engineering
Academic Year 2024

Student's Signature 
Advisor's Signature 
Co-Advisor's Signature 

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี อันเป็นผลมาจากความเมตตา กรุณา และการสนับสนุนจากผู้ทรงคุณวุฒิ และผู้มีส่วนเกี่ยวข้องหลายท่าน ซึ่งผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิชน วัชรนทร์วงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.ชนัดต์ โชคเจริญรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนแนวทางการแก้ไขปัญหาค้นเป็นประโยชน์ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย วิจิตรเสถียร ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรุฒิชัยวัฒน์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรรถพล มณีแดง กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และคณาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และความรู้ทางด้านวิชาการอย่างดี

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี รวมถึง เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้งานเครื่องมือวิจัย พร้อมทั้งให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ บริษัท อุตสาหกรรมโคราช จำกัด ที่กรุณาเอื้อเฟื้อวัสดุดิบขานอ้อยเพื่อใช้ในการวิจัย และขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เป็นอย่างสูง ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ทรัพยากร และสิ่งอำนวยความสะดวกต่าง ๆ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการดำเนินการวิจัยให้บรรลุผลสำเร็จตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยณรงค์ สกกุลแก้ว ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย ตลอดจนนักวิทยาศาสตร์ประจำห้องปฏิบัติการ ภาควิชาการพยาบาลทางสัตวแพทย์ คณะเทคนิคการสัตวแพทย์ และนักวิทยาศาสตร์ประจำห้องปฏิบัติการ ภาควิชาเทคโนโลยี และการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน ที่ได้กรุณาให้ความช่วยเหลือในการใช้สถานที่ การใช้อุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ ในการทำวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่อบรมเลี้ยงดู และส่งเสริมการศึกษามาโดยตลอด และขอบคุณทุกคนในครอบครัวที่คอยห่วงใย ดูแล และให้กำลังใจเสมอมา จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิต

ปรียาพร สีชุมเหล็ก

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฅ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	3
1.4 สมมติฐานงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
2 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 สารก่อกำจัดศัตรูพืช.....	5
2.2 เมโธมิล	11
2.2.1 คุณสมบัติทางเคมี.....	11
2.2.2 การนำไปใช้ในทางการเกษตร	11
2.2.3 การสลายตัวของเมโธมิล	12
2.2.4 ค่ามาตรฐานการปนเปื้อนของสารเมโธมิลในสิ่งแวดล้อม	13
2.3 แอโรเจล.....	14
2.3.1 การจำแนกประเภทและสมบัติของแอโรเจล.....	15
2.3.2 เซลลูโลสแอโรเจล	16
2.3.3 กระบวนการสังเคราะห์แอโรเจล	16
2.3.4 การประยุกต์ใช้แอโรเจลในด้านสิ่งแวดล้อม	17
2.4 การสังเคราะห์สังกะสีประจุศูนย์.....	18
2.4.1 สังกะสีประจุศูนย์.....	18
2.4.2 การสังเคราะห์สังกะสีประจุศูนย์	19

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5	สังกะสีที่ดัดแปลงด้วยซัลไฟด์	20
2.6	กระบวนการออกซิเดชันด้วยสารเปอร์ซัลเฟต	21
2.7	จลนพลศาสตร์การดูดซับ	24
2.7.1	สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม	24
2.7.2	สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม	25
2.8	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	26
2.8.1	การปรับสภาพของเสียเซลลูโลส	26
2.8.2	การใช้เซลลูโลสแอโรเจลในการกำจัดมลพิษโดยวิธีการทำแห้งด้วยแรงดันแวดล้อม	29
2.8.3	การใช้สังกะสีประจุศูนย์ในการกำจัดมลพิษ	31
2.8.4	การใช้สารเปอร์ซัลเฟตในการกำจัดมลพิษ	33
2.8.5	การบำบัดสารเมโรมิลด้วยกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง	36
3	การศึกษาดำเนินงาน	39
3.1	สารเคมี เครื่องมือ และอุปกรณ์	41
3.1.1	สถานที่ทำการศึกษาวิจัย	41
3.1.2	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	41
3.2	การสังเคราะห์แอโรเจลจากของเสียภาคอุตสาหกรรม	41
3.2.1	การปรับสภาพของเสียเซลลูโลสจากภาคอุตสาหกรรม	41
3.2.2	การสังเคราะห์แอโรเจลจากของเสียเซลลูโลสจากภาคอุตสาหกรรม	43
3.2.3	การสังเคราะห์แอโรเจลที่ผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์	44
3.2.4	การสังเคราะห์แอโรเจลที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์	45
3.2.5	การวิเคราะห์คุณลักษณะสมบัติด้วยเครื่องมือต่าง ๆ	45
3.3	การบำบัดสารเมโรมิล	46
3.3.1	การเตรียมสารละลายเมโรมิล	46
3.3.2	การเตรียมสารละลายโซเดียมเปอร์ซัลเฟต	47
3.3.3	การศึกษาปัจจัยในการบำบัดสารเมโรมิล	47
3.4	การวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของสารเมโรมิล	52
4	ผลการทดลองและอภิปราย	54
4.1	ส่วนการศึกษาคูณลักษณะสมบัติ	54
4.1.1	เทคนิควิเคราะห์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	54
4.1.2	เทคนิควิเคราะห์ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FTIR)	56

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.3	เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD).....59
4.1.4	เทคนิควิเคราะห์พื้นที่ผิวและหาความพรุนของอนุภาค (BET)61
4.1.5	เทคนิควิเคราะห์ถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์สามมิติระดับจุลภาค ด้วยเอกซเรย์ย่านพลังงานสูงจากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอน (XTM)....62
4.2	ส่วนการศึกษาการบำบัดสารเมไธมิล65
4.2.1	ผลของการศึกษาชนิดของแอโรเจลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดเมไธมิล.....65
4.2.2	ผลของการศึกษาความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟตต่อประสิทธิภาพ ในการกำจัดสารเมไธมิล.....66
4.2.3	ผลของการศึกษาระยะเวลาการสัมผัสต่อประสิทธิภาพในการกำจัด สารเมไธมิล.....67
4.2.4	ผลของการศึกษาผลของความเร็วยวรอบในการกวนต่อประสิทธิภาพ ในการกำจัดสารเมไธมิล.....68
4.2.5	ผลของการศึกษาผลของค่าความเป็นกรดต่างต่อประสิทธิภาพ ในการกำจัดสารเมไธมิล.....70
4.2.6	ผลการศึกษาลดผลศาสตร์การกำจัดสารเมไธมิลร่วมกับสารเปอร์ซัลเฟต....71
4.2.7	กลไกของการกำจัดสารเมไธมิลด้วยแอโรเจลที่ปรับปรุงด้วยซิลไฟด์ ร่วมกับการเติมเปอร์ซัลเฟต74
5	สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ.....79
5.1	สรุปผลการวิจัย79
5.1.1	สรุปคุณลักษณะสมบัติของแอโรเจลผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ ที่ปรับปรุงด้วยซิลไฟด์.....79
5.1.2	สรุปการศึกษาการบำบัดสารเมไธมิล.....80
5.2	ข้อเสนอแนะ82
รายการอ้างอิง 83
ภาคผนวก	
ก	ผลการบำบัดสารเมไธมิล.....92
ข	รูปประกอบการปรับสภาพของเสียขานอ้อยด้วยกระบวนการทางเคมี.....97
ค	รูปประกอบการสังเคราะห์แอโรเจล99
ง	รูปประกอบการสังเคราะห์แอโรเจลผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซิลไฟด์ 101
จ	บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา 103
ประวัติผู้เขียน 111

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ปริมาณการนำเข้าวัตถุดิบอันตรายทางการเกษตรของประเทศไทยปี พ.ศ. 25560 ถึง 25667
2.2	สารกำจัดศัตรูพืชและความเป็นพิษที่ต้องเฝ้าระวัง 12 ชนิด8
2.3	สมบัติความเป็นพิษของสารกำจัดศัตรูพืชที่ต้องเฝ้าระวัง 12 ชนิด9
2.4	อัตราการใช้เมโทมิลกับพืชชนิดต่างๆ ตามคำแนะนำในประเทศสหรัฐอเมริกา 12
2.5	การควบคุมทางกฎหมายเกี่ยวกับสารเมโทมิลของแต่ละประเทศ 14
2.6	การปรับสภาพของเสียเซลลูโลส 27
2.7	การสังเคราะห์เซลลูโลสแอโรเจลในการกำจัดมลพิษโดยวิธีทำแห้งด้วยแรงดันแวดล้อม 30
2.8	การใช้สังกะสีประจุศูนย์ในการกำจัดมลพิษ 32
2.9	การใช้สารเปอร์ซัลเฟตในการกำจัดมลพิษ 34
2.10	การบำบัดสารเมโทมิลด้วยกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง 38
3.1	วิเคราะห์คุณลักษณะสมบัติด้วยเครื่องมือต่าง ๆ 46
3.2	การวิเคราะห์สารละลายเมโทมิลด้วยเทคนิค (HPLC) 53
4.1	ค่าดัชนีผลึกของซันอ้อยและเซลลูโลสจากซันอ้อย 60
4.2	พื้นที่ผิวของแอโรเจล และแอโรเจลที่ผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ 61
4.3	การศึกษาจลนพลศาสตร์เกี่ยวกับความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟตต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมโทมิล 72

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	จำนวนงานเกี่ยวกับแอรโรเจลที่ถูกตีพิมพ์ในแต่ละปีที่ผ่านมา	15
2.2	โครงสร้างผลึกของซิลไฟด์สฟาเลอไรต์และเวิร์ตไซต์	20
3.1	ขั้นตอนการศึกษาวิจัย	40
3.2	ขั้นตอนการปรับสภาพของเสียภาคอุตสาหกรรม.....	42
3.3	ขั้นตอนการสังเคราะห์แอรโรเจลจากของเสียเซลลูโลสจากภาคอุตสาหกรรม.....	43
3.4	การสังเคราะห์แอรโรเจลที่ผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซิลไฟด์	44
3.5	การสังเคราะห์แอรโรเจลที่ปรับปรุงด้วยซิลไฟด์	45
3.6	การเตรียมสารละลายเมโรมิล.....	46
3.7	การเตรียมสารละลายโซเดียมเปอร์ซิลเฟต	47
3.8	การศึกษาชนิดของแอรโรเจล	48
3.9	การศึกษาความเข้มข้นของสารเปอร์ซิลเฟต	49
3.10	การศึกษาระยะเวลาในการสัมผัส.....	50
3.11	การศึกษาความเร็วรอบในการกวน.....	51
3.12	การศึกษาค่าความเป็นกรดต่าง	52
4.1	ภาพถ่าย SEM	55
4.2	ผลการวิเคราะห์ FTIR ขานอ้อย และเซลลูโลสจากขานอ้อย.....	57
4.3	ผลการวิเคราะห์ FTIR แอรโรเจลและแอรโรเจลผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซิลไฟด์..	58
4.4	ผลการวิเคราะห์ XRD ของขานอ้อยและเซลลูโลสจากขานอ้อย.....	60
4.5	ผลการวิเคราะห์ XTM ของแอรโรเจลและแอรโรเจลผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ ที่ปรับปรุงด้วยซิลไฟด์	63
4.6	ผลของการศึกษาชนิดของแอรโรเจลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมโรมิล.....	65
4.7	ผลของการศึกษาความเข้มข้นของสารเปอร์ซิลเฟตต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมโรมิล	66
4.8	ผลของการศึกษาระยะเวลาในการสัมผัสต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมโรมิล	68
4.9	ผลของการศึกษาผลของความเร็วยรอบในการกวนต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมโรมิล	69
4.10	ผลของการศึกษาผลของค่าความเป็นกรดต่างต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมโรมิล.....	70
4.11	การศึกษาลนพลศาสตร์สำหรับการศึกษาความเข้มข้นของสารเปอร์ซิลเฟตต่อประสิทธิภาพ ในการกำจัดสารเมโรมิล.....	73
4.12	กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของคาร์โบฟูราน (CBF) ด้วยอนุภาคลิธเรซซิลเฟต	76
4.13	การย่อยสลายของสารเมโรมิลโดยใช้ ระบบ PMS-Only	77

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

Zn ⁰	=	สังกะสีประจุศูนย์
FTIR	=	เทคนิควิเคราะห์ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์
XRD	=	เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
SEM	=	เทคนิควิเคราะห์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
BET	=	เทคนิควิเคราะห์พื้นที่ผิวและหาความพรุนของอนุภาค
XTM	=	เทคนิควิเคราะห์ถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์สามมิติระดับจุลภาคด้วยเอกซเรย์ ย่านพลังงานสูง
HPLC	=	เทคนิควิเคราะห์โครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง
S-ZV-Zn-Aerogel	=	แอโรเจลที่ผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซิลไฟต์
Sulfide-modified aerogel	=	แอโรเจลที่ปรับปรุงด้วยซิลไฟต์
nm	=	นาโนเมตร
m ² /g	=	ตารางเมตรต่อกรัม
PS	=	เปอร์ซัลเฟต
SO ₄ ^{•-}	=	อนุมูลอิสระซัลเฟต
•OH	=	อนุมูลอิสระไฮดรอกซิล

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบันภาคเกษตรกรรมของประเทศไทยมีการพึ่งพาเทคโนโลยีและการใช้สารเคมีในปริมาณที่มากขึ้น เพื่อเพิ่มผลผลิตทางการเกษตรให้สามารถแข่งขันได้ในระดับตลาดทั้งในประเทศและต่างประเทศ หนึ่งในองค์ประกอบสำคัญที่มีการนำมาใช้ในระบบเกษตรกรรม คือ สารเคมีกำจัดศัตรูพืชและสารเคมีกำจัดวัชพืช โดยสารกำจัดศัตรูพืชที่นิยมใช้และมีประสิทธิภาพสูง ได้แก่ คาร์โบฟูราน คลอร์ไพริฟอส และเมโทมิล เป็นต้น

สารเมโทมิล (Methomyl) เป็นหนึ่งในสารที่ได้รับความนิยมในวงการเกษตร เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการกำจัดศัตรูพืชได้รวดเร็วและครอบคลุม อย่างไรก็ตามการใช้สารเคมีเหล่านี้หากขาดความรู้ ความเข้าใจ และการควบคุมที่เหมาะสมจะส่งผลให้เกิดปัญหาการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ สารเมโทมิลจัดอยู่ในกลุ่มสารเคมีกำจัดศัตรูพืชประเภทคาร์บาเมต ซึ่งมีคุณสมบัติในการออกฤทธิ์ต่อระบบประสาท โดยกลไกหลักคือการยับยั้งเอนไซม์อะเซทิลโคลีนเอสเตอเรส (Acetylcholinesterase, AChE) ส่งผลให้ระบบประสาทของศัตรูพืชทำงานผิดปกติจนถึงขั้นเสียชีวิต และส่งผลต่อความเป็นพิษต่อมนุษย์และสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมอยู่ในระดับสูงเช่นกัน อย่างไรก็ตามองค์การอนามัยโลก (WHO) จัดให้สารเมโทมิลอยู่ในกลุ่ม Class Ib ซึ่งเป็นสารที่มีความเป็นอันตรายสูง การได้รับสารเมโทมิลในปริมาณมากสามารถทำให้เกิดอาการคลื่นไส้ อาเจียน อ่อนแรง ชักเกร็ง และอาจถึงแก่ชีวิตได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อตกค้างในแหล่งน้ำธรรมชาติหรือแหล่งน้ำใต้ดิน ซึ่งสารเมโทมิลมีค่าการละลายน้ำที่สูงทำให้สามารถแพร่กระจายได้อย่างรวดเร็วและกว้างขวางสามารถส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ระบบนิเวศและสุขภาพของประชาชนในระยะยาวได้ (Van Scoy et al., 2013) ปัญหาการปนเปื้อนของสารเมโทมิลในน้ำจึงกลายเป็นประเด็นสำคัญที่จำเป็นต้องได้รับการแก้ไขอย่างเร่งด่วนโดยเฉพาะในพื้นที่เกษตรกรรมที่มีการใช้สารดังกล่าวในปริมาณมาก แนวทางการกำจัดสารเมโทมิลจากแหล่งน้ำมีหลากหลายวิธี ได้แก่ กระบวนการตกตะกอน (Misra et al., 2013) กระบวนการกรองทางกายภาพ (El-Geundi et al., 2013) กระบวนการทางชีวภาพ (Lin et al., 2020) กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Fan et al., 2009) และกระบวนการดูดซับ (Chang et al., 2012)

โดยในปัจจุบันกระบวนการดูดซับ (Adsorption) ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางเนื่องจากเป็นวิธีการที่เรียบง่าย มีประสิทธิภาพสูง และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยสามารถใช้วัสดุธรรมชาติหรือวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในการผลิตวัสดุดูดซับที่มีต้นทุนต่ำและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ นอกจากนี้กระบวนการดูดซับยังสามารถปรับปรุงและพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารมลพิษต่าง ๆ จากน้ำเสีย (Wu et al., 2023) วัสดุดูดซับที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสีย โดยเฉพาะวัสดุที่สังเคราะห์ได้จากธรรมชาติและวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมีความสนใจเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากมีต้นทุนต่ำ หาง่ายในท้องถิ่นและมีประสิทธิภาพในการดูดซับสารมลพิษ ซึ่งวัสดุที่นิยม

นำมาใช้ ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ ไบโอดีคาร์ วัสดุอนินทรีย์ เป็นต้น ในบรรดาวัสดุดูดซับที่มีศักยภาพสูง แอโรเจล (aerogel) ถือเป็นวัสดุที่โดดเด่นเนื่องจากเป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงและมีความหนาแน่นต่ำ (Rafieian et al., 2024) ซึ่งลักษณะเฉพาะเหล่านี้เอื้อต่อการดูดซับสารเคมีปนเปื้อนในน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม แอโรเจลสามารถสังเคราะห์ได้จากเซลล์ลูโลส ซึ่งเป็นวัสดุชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถผลิตได้จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรด้วยคุณสมบัติดังกล่าว เซลล์ลูโลสแอโรเจลจึงเป็นทางเลือกที่มีศักยภาพสำหรับการพัฒนาเป็นวัสดุดูดซับเพื่อใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย หนึ่งในแหล่งวัตถุดิบที่สำคัญในการผลิตเซลล์ลูโลสคือชานอ้อยเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำตาล โดยชานอ้อยมีปริมาณเซลล์ลูโลสสูงถึงประมาณร้อยละ 45 ของน้ำหนักแห้ง (Rocha et al., 2011) ด้วยเหตุนี้ชานอ้อยจึงถือเป็นวัตถุดิบที่เหมาะสมในการนำมาสกัดเซลล์ลูโลสที่มีคุณภาพสูงเพื่อใช้ในการสังเคราะห์เซลล์ลูโลสแอโรเจลต่อไป ทั้งนี้การนำชานอ้อยมาสกัดเป็นเซลล์ลูโลสและนำมาสังเคราะห์เป็นแอโรเจลไม่เพียงแต่ช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งเท่านั้นแต่ยังเป็นการส่งเสริมแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียนอย่างยั่งยืนอีกด้วย อย่างไรก็ตาม การสังเคราะห์เซลล์ลูโลสแอโรเจลสามารถทำได้หลายวิธีโดยวิธีที่นิยมและเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ในระดับอุตสาหกรรมโดยการทำแห้งด้วยแรงดันแวดล้อมบรรยากาศ ซึ่งเป็นเทคนิคที่ง่าย ปลอดภัย ไม่ต้องใช้ความดันสูง และประหยัดพลังงาน (Ebrahimi et al., 2020) โดยแอโรเจลที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการทำแห้งด้วยแรงดันแวดล้อมบรรยากาศนี้ยังคงคุณสมบัติโครงสร้างรูพรุนที่เหมาะสมต่อการดูดซับสารเคมีในน้ำเสีย แม้ว่าเซลล์ลูโลสแอโรเจลมีคุณสมบัติที่ดีในการดูดซับสารพิษ แต่งานวิจัยในปัจจุบันมุ่งเน้นในการปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพโดยการเติมสารเคมีเพื่อช่วยกระตุ้นปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันในระบบการกำจัดมลพิษ หนึ่งในสารที่ได้รับความสนใจคือสังกะสีประจุศูนย์ (Zero-valent Zinc, Zn^0) ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานต่ำ (-0.763 โวลต์) (Yang et al., 1982) สามารถปล่อยอิเล็กตรอนได้ง่ายและกระตุ้นการรีดิวซ์ของสารพิษในน้ำได้ดี จุดเด่นของสังกะสีประจุศูนย์ ได้แก่ ความเป็นพิษต่ำ ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ และต้นทุนต่ำเมื่อเทียบกับโลหะชนิดอื่น อย่างไรก็ตามสังกะสีประจุศูนย์มีข้อจำกัดคือ การเกิดออกซิเดชันเมื่อสัมผัสกับน้ำทำให้สูญเสียประสิทธิภาพ เพื่อแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าวจึงมีการใช้ซัลไฟด์ (S^{2-}) เข้ามาช่วยสร้างชั้นป้องกันบนผิวของสังกะสีประจุศูนย์ ทำให้สามารถรักษาสถานะประจุศูนย์ได้นานขึ้นและยังเพิ่มเสถียรภาพของวัสดุในสภาวะน้ำเสีย นอกจากนี้การเติมซัลไฟด์ยังช่วยกระตุ้นการเกิดอนุมูลอิสระเมื่อใช้งานร่วมกับสารออกซิแดนท์ เช่น สารเปอร์ซัลเฟต (Persulfate) ซึ่งเป็นสารกระตุ้นที่นิยมในกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง โดยสังกะสีประจุศูนย์และซัลไฟด์จะช่วยกระตุ้นให้เปอร์ซัลเฟตแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระซัลเฟต ($SO_4^{\bullet-}$) และอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ($\bullet OH$) ซึ่งมีศักยภาพสูงในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่มีพิษ กลไกในการกำจัดเมโรมิลในงานวิจัยนี้จึงประกอบด้วยกระบวนการหลายระดับ ได้แก่ กลไกการดูดซับของแอโรเจลและกลไกการย่อยสลายทางเคมีผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจในการสังเคราะห์แอโรเจลจากของเสียอุตสาหกรรมน้ำตาลผสมสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ เพื่อนำไปทำปฏิกิริยากับสารเปอร์ซัลเฟตในการกำจัดสารเมโรมิล โดยจะใช้เซลล์ลูโลสที่ได้จากชานอ้อย เพื่อศึกษาการสังเคราะห์แอโรเจลผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ ขั้นตอนแรกนำชานอ้อยจากมาทำการปรับสภาพทางเคมี เพื่อให้ได้

เซลล์ลอสก่อนจากนั้นนำไปสู่ขั้นตอนการสังเคราะห์แอโรเจลและนำแอโรเจลไปผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ ซึ่งการนำแอโรเจลมาผสมสังกะสีประจุศูนย์เพื่อเพิ่มความสามารถในการให้อิเล็กตรอนและการปรับปรุงด้วยซัลไฟด์เพื่อเพิ่มการถ่ายโอนอิเล็กตรอนให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งการเติมสังกะสีประจุศูนย์และเติมซัลไฟด์ยังช่วยในการกระตุ้นสารเปอร์ซัลเฟตให้เกิดเป็นอนุมูลอิสระซัลเฟตและอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลอีกด้วย จากนั้นทำการศึกษาคุณลักษณะสมบัติของแอโรเจลด้วยเทคนิคต่าง ๆ ได้แก่ SEM FTIR XRD BET และ XTM และทำการศึกษากำจัดสารเมโรมิลร่วมกับสารเปอร์ซัลเฟตที่สภาวะปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ชนิดของแอโรเจล ความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟต ระยะเวลาสัมผัส ความเร็วรอบในการกวน และค่าความเป็นกรดต่าง ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นการบูรณาการความรู้ด้านวัสดุศาสตร์ เคมีสิ่งแวดล้อม และเทคโนโลยีการบำบัดน้ำ เพื่อนำของเสียจากภาคอุตสาหกรรมมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดผ่านการพัฒนาเซลล์ลอสแอโรเจลที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมโรมิลและสามารถประยุกต์ใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียได้ในอนาคตอย่างยิ่ง

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาการสังเคราะห์แอโรเจลจากขานอ้อยผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์

1.2.2 เพื่อศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดเมโรมิลด้วยแอโรเจลผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 งานวิจัยนี้จะใช้ขานอ้อยจากอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาลเพื่อสังเคราะห์แอโรเจล

1.3.2 งานวิจัยนี้ทำการสังเคราะห์แอโรเจลด้วยวิธีทำแห้งด้วยแรงดันแวดล้อม

1.3.3 ปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการกำจัดเมโรมิลที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ชนิดของแอโรเจล ความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟต ระยะเวลาสัมผัส ความเร็วรอบในการกวน และค่าความเป็นกรดต่าง

1.4 สมมุติฐานของงานวิจัย

1.4.1 แอโรเจลที่ผสมกับสังกะสีประจุศูนย์และปรับปรุงด้วยซัลไฟด์มีความสามารถในการกำจัดเมโรมิลได้มากกว่าแอโรเจลที่ไม่มีการผสมสังกะสีประจุศูนย์และไม่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์

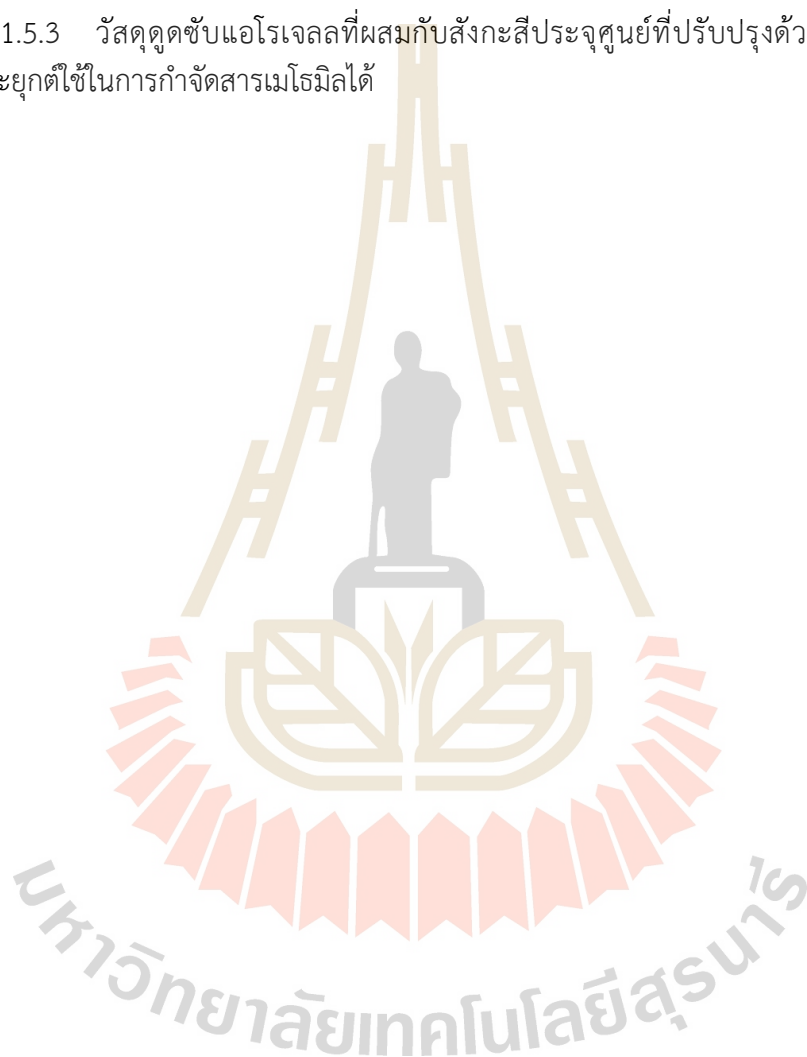
1.4.2 แอโรเจลที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์สามารถกระตุ้นเปอร์ซัลเฟตในการกำจัดสารเมโรมิลได้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ชานอ้อยสามารถสังเคราะห์เป็นวัสดุดูดซับแอมโมเนียที่ผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ได้

1.5.2 ได้สภาวะที่เหมาะสมที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพการกำจัดสารแอมโมเนีย เช่น ชนิดของแอมโมเนีย ความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟต ระยะเวลาสัมผัส ความเร็วรอบในการกวน และค่าความเป็นกรดต่าง

1.5.3 วัสดุดูดซับแอมโมเนียที่ผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดสารแอมโมเนียได้



บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สารกำจัดศัตรูพืช (Pesticides)

สารกำจัดศัตรูพืชเป็นสารเคมีที่ออกแบบมาเพื่อป้องกันและกำจัดศัตรูพืชต่าง ๆ ที่อาจเป็นอันตรายต่อผลผลิตทางการเกษตรหรือสิ่งแวดล้อมได้ เช่น วัชพืช แมลง เชื้อรา และสัตว์ขนาดเล็กที่เป็นศัตรูของพืช เมื่อใช้สารกำจัดศัตรูพืชอย่างเหมาะสมและถูกต้องจะช่วยในการเพิ่มผลผลิตของพืช โดยลดความเสี่ยงจากการทำลายของศัตรูพืชได้ นอกจากนี้ยังสามารถป้องกันการระบาดของโรคที่มีพาหะมาจากสัตว์ขนาดเล็กได้อีกด้วย การใช้สารกำจัดศัตรูพืชนั้นมีความเสี่ยงต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพมนุษย์ ดังนั้นจึงมีมาตรการควบคุมและกำกับในการผลิต การนำเข้า และการส่งออกสารเคมีเหล่านี้ ตามพระราชบัญญัติวัตถุอันตราย พ.ศ. 2535 เพื่อให้มั่นใจว่าการใช้งานเหล่านี้ เป็นไปตามหลักการปลอดภัยและมีประสิทธิภาพในการควบคุมศัตรูพืชและรักษาคุณภาพผลผลิตของเกษตรกรได้ดีที่สุดโดยไม่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภคและสิ่งแวดล้อมทั่วไป สารกำจัดศัตรูพืชสามารถแบ่งกลุ่มตามชนิดของการทำงานทางการเกษตรกรรมได้เป็น 4 กลุ่มหลัก ๆ ได้แก่

1) สารเคมีที่ใช้เพื่อการกำจัดแมลง (Insecticides)

สารเคมีในกลุ่มนี้ถูกออกแบบมาเพื่อควบคุมและกำจัดแมลงที่เป็นศัตรูของพืช เช่น แมลงที่กัดกินใบพืชหรือเจาะลำต้น เป็นต้น เช่น คาร์บาเมต ไสเปอร์เมทริน มาลาไทออน ฟิริมेटริน เป็นต้น

2) สารเคมีที่ใช้เพื่อการกำจัดหนูและสัตว์ฟันแทะ (Rodenticides)

สารเคมีในกลุ่มนี้ใช้สำหรับกำจัดหนูและสัตว์ฟันแทะที่เป็นศัตรูของพืชหรือศัตรูในสิ่งแวดล้อม เช่น คุมาดิน บรอมอะฟีโนส วาร์ฟาริน เป็นต้น

3) สารเคมีที่ใช้เพื่อการกำจัดเชื้อรา (Fungicides)

สารเคมีในกลุ่มนี้มีประสิทธิภาพในการควบคุมและกำจัดเชื้อราที่เป็นตัวรบกวนในพืช เช่น โพรคลอราซ มานโคซิป คลอโรทาโลนิล แซงคอสเซ็บ เป็นต้น

4) สารเคมีที่ใช้เพื่อการกำจัดวัชพืช (Herbicides)

สารเคมีในกลุ่มนี้ออกแบบมาเพื่อควบคุมหรือกำจัดวัชพืชที่มีอายุยาวนานหรืออาจตายยาก เช่น ไกลโฟเซต แอตราซีน มีโทรดิน ดิควานิล เป็นต้น

ดังนั้นเกษตรกรจึงจำเป็นต้องพัฒนาวิธีการทำเกษตรกรรมอย่างยั่งยืนที่สามารถใช้ทรัพยากรที่มีอยู่ให้เต็มประสิทธิภาพ และนำเทคโนโลยีในการควบคุมวัชพืชเข้ามาใช้เพื่อลดความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นจากการขาดแคลนแรงงาน นอกจากนี้ยังควรใช้สารกำจัดศัตรูพืชอย่างมีความระมัดระวัง เพื่อป้องกันความเสี่ยงต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพมนุษย์และสัตว์ได้ (อนุสรณ์ แก้วการ, 2562) โดยในประเทศไทยมีการนำเข้าสารกำจัดศัตรูพืชมาใช้ทางการเกษตรในปริมาณเพิ่มขึ้นทุกปี และสารกำจัดวัชพืชมีการนำเข้าตามข้อมูลของสำนักควบคุมพืชและวัสดุการเกษตร กรมวิชาการเกษตร ซึ่งได้

รวบรวมไว้ในตารางปริมาณการนำเข้าวัตถุอันตรายทางการเกษตรของประเทศไทยในปี พ.ศ. 2560 ถึง 2566 แสดงดังตารางที่ 2.1

จากการศึกษาการใช้สารกำจัดศัตรูพืชของเกษตรกรมีความต้องการในการใช้สารเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้กรมควบคุมโรคมีความตระหนักในพิษของสารกำจัดศัตรูพืชที่ใช้จึงต้องติดตามตรวจสอบและเฝ้าระวังในการใช้งานโดยมีสารกำจัดศัตรูพืชที่ต้องเฝ้าระวังในการใช้งานทั้งหมด 12 ชนิด แสดงดังตารางที่ 2.2 ซึ่งการจำแนกสารกำจัดศัตรูพืชตามระดับความเป็นพิษขององค์การอนามัยโลก (WHO, 2019) แบ่งออกเป็นหลายระดับ โดยระดับ Ia (Extremely hazardous) และระดับ Ib (Highly hazardous) เป็นสองระดับที่มีความเป็นพิษสูงสุด การจัดกลุ่มพิจารณาจากค่า LD50 ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกปริมาณสารที่ทำให้สัตว์ทดลองตายครั้งหนึ่ง (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักตัว) โดยค่าที่ต่ำกว่าหมายถึงความเป็นพิษที่สูงกว่า ซึ่งสารที่มีค่า LD50 ต่ำกว่า 5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จัดอยู่ในกลุ่ม Ia ส่วนสารที่มีค่า LD50 ระหว่าง 5-50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จัดอยู่ในกลุ่ม Ib การจำแนกประเภทนี้มีผลต่อการควบคุมและการใช้สารเคมีในภาคเกษตรกรรม เนื่องจากสารที่อยู่ในกลุ่ม Ia และ Ib อาจต้องมีมาตรการป้องกันและข้อกำหนดที่เข้มงวดขึ้นเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์ และตารางที่ 2.3 แสดงสมบัติความเป็นพิษของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชที่ต้องระวัง 12 ชนิด ซึ่งสารเคมีกำจัดศัตรูพืชแต่ละชนิดมีระดับความเป็นพิษที่แตกต่างกัน โดยแบ่งออกเป็นพิษเฉียบพลันและพิษเรื้อรัง ซึ่งส่งผลกระทบต่อร่างกายในรูปแบบที่แตกต่างกัน ดังนั้นการใช้สารเหล่านี้ต้องระมัดระวัง ควบคุมปริมาณและปฏิบัติตามมาตรการความปลอดภัยอย่างเคร่งครัด เพื่อป้องกันอันตรายต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม



ตารางที่ 2.1 ปริมาณการนำเข้าวัตถุดิบทรายทางการเกษตรของประเทศไทยปี พ.ศ. 25560 ถึง 2566 (สำนักควบคุมพืชและวัสดุการเกษตร, 2566)

ประเภทของ วัตถุดิบทราย	ปริมาณ (กิโลกรัม)						
	ปี พ.ศ.						
	2560	2561	2562	2563	2564	2565	2566
สารกำจัด	148,421,250.64	125,280,994.73	88,846,604.94	57,007,428.61	74,164,721.11	72,469,392.92	90,465,131.30
สารกำจัดแมลง	21,601,165.07	17,325,115.12	16,897,635.70	18,946,007.93	29,554,171.94	18,826,907.31	22,559,603.74
สารป้องกันและกำจัดโรคพืช	19,923,099.29	21,004,887.38	19,334,856.24	15,176,713.82	24,248,160.75	18,182,499.27	22,702,153.78
สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช	3,837,433.16	3,569,256.92	3,270,276.98	4,153,100.09	5,461,828.38	2,006,800.00	2,578,260.24
สารรมควันพืช	1,099,955.52	890,615.38	740,862.88	635,627.88	82,582.52	25,035.00	0
สารกำจัดหอยและหอยทาก	812,351.00	1,217,624.00	254,874.00	54,000.00	405,979.00	555,789.20	761,281.60
สารกำจัดไร	1,838,503.60	1,391,940.34	1,590,481.79	2,021,092.49	1,735,855.69	1,436,801.00	1,699,546.99
สารกำจัดหนู	113,005.00	143,000.00	187,000.00	142,000.00	288,800.00	85,200.00	61,840.00
สารกำจัดไส้เดือนฝอย	0	3,213.43	25,842.60	118,876.00	159,203.00	77,070.00	33,600.00
รวม	197,646,763.28	170,826,647.30	131,148,435.12	98,254,846.83	136,101,302.39	113,665,495.00	140,861,417.70

ตารางที่ 2.2 สารกำจัดศัตรูพืชและความเป็นพิษที่ต้องเฝ้าระวัง 12 ชนิด (สำนักโรคจากการประกอบอาชีพและสิ่งแวดล้อม, 2556)

ลำดับ	ชื่อสารเคมี	กลุ่ม	ระดับความเป็นพิษ	LD ₅₀ มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
1	อัลดีคาร์บ (Aldicarb)	Carbamate	la	0.93
2	บลาสติซิดิน (Blasticidin-s)	Antibiotic	lb	16
3	คาร์โบฟูราน (Carbofuran)	Carbamate	lb	8
4	ไดโครโตฟอส (Dicrotophos)	Organophosphate	lb	22
5	อีพีเอ็น (EPN)	Organophosphate	la	14
6	อีโพรฟอส (Ethoprofos)	Organophosphate	la	33
7	โฟมีทาเนต (Formethanate)	Carbamate	-	21
8	เมทิดาธาออน (Methidathion)	Organophosphate	lb	25
9	เมโธมิล (Methomyl)	Carbamate	lb	17
10	ออกซามิล (Oxamyl)	Carbamate	lb	6
11	เอ็นโดซัลแฟน (Endosulfan)	Organochloride	li	80
12	พาราไรออนเมทิล (Parathion Methyl)	Organophosphate	la	14

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 2.3 สมบัติความเป็นพิษของสารกำจัดศัตรูพืชที่ต้องเฝ้าระวัง 12 ชนิด (สำนักโรคจากการประกอบอาชีพและสิ่งแวดล้อม, 2556)

ลำดับ	ชื่อสารเคมี	สมบัติความเป็นพิษ
1	อัลดิคาร์บ (Aldicarb)	พิษเฉียบพลัน : ทำให้ระคายเคืองผิวหนัง ทางเดินหายใจ และทางเดินอาหาร ทำให้ท้องเสีย ยับยั้งเอ็นไซม์โคลีนเอสเตอเรส พิษเรื้อรัง : มีผลต่อระบบประสาท และพันธุกรรมทำให้ Chromosome Breakdown ทำลายเม็ดเลือดขาว
2	บลาสติซิดิน (Blasticidin-s)	พิษเฉียบพลัน : ทำให้คลื่นไส้ อาเจียน ท้องเสียผิวหนังอักเสบ พิษเรื้อรัง : มีผลต่อการสร้างโปรตีนของเซลล์
3	คาร์โบฟูราน (Carbofuran)	พิษเฉียบพลัน : ทำให้ระคายเคืองผิวหนัง ทางเดินหายใจ และทางเดินอาหาร ทำให้ท้องเสีย ยับยั้งเอ็นไซม์โคลีนเอสเตอเรส มีผลต่อระบบประสาท ทำให้สั่น กระตุก กล้ามเนื้ออ่อนแรง หายใจลำบาก ปวดศีรษะ ท้องเสีย พิษเรื้อรัง : ยับยั้งเอ็นไซม์โคลีนเอสเตอเรส มีผลต่อพันธุกรรม มีบุตรยาก หรืออาจทำให้กลายพันธุ์ อาจก่อมะเร็ง
4	ไดโครโตฟอส (Dicrotophos)	พิษเฉียบพลัน : ทำให้ระคายเคืองผิวหนัง ทางเดินหายใจ และทางเดินอาหาร แสบตา น้ำตาไหล ยับยั้งเอ็นไซม์โคลีนเอสเตอเรส พิษเรื้อรัง : ยับยั้งเอ็นไซม์โคลีนเอสเตอเรส อาจมีผลต่อการสืบพันธุ์และความผิดปกติของทารกแรกเกิด แต่ไม่มีหลักฐานการเกิดมะเร็ง
5	อีพีเอ็น (EPN)	พิษเฉียบพลัน : ทำให้ระคายเคืองผิวหนัง ทางเดินหายใจ และทางเดินอาหาร ยับยั้งเอ็นไซม์โคลีนเอสเตอเรส มีผลต่อระบบประสาท ทำให้สั่น กระตุกก้ามเนื้ออ่อนแรง หายใจลำบาก ปวดศีรษะ พิษเรื้อรัง : ไม่เป็นมะเร็ง
6	อีโธโปรฟอส (Ethoprofos)	พิษเฉียบพลัน : ทำให้ระคายเคืองผิวหนัง ทางเดินหายใจ และทางเดินอาหาร ยับยั้งเอ็นไซม์โคลีนเอสเตอเรส มีผลต่อระบบประสาท ทำให้สั่น กระตุกก้ามเนื้ออ่อนแรง หายใจลำบาก ปวดศีรษะ พิษเรื้อรัง : ยับยั้งเอ็นไซม์โคลีนเอสเตอเรส ไม่เป็นสารก่อมะเร็ง
7	โฟมีทานเนต (Formethanate)	พิษเฉียบพลัน : ทำให้ระคายเคืองผิวหนัง ทางเดินหายใจ และทางเดินอาหาร ยับยั้งเอ็นไซม์โคลีนเอสเตอเรส มีผลต่อระบบประสาท ทำให้สั่น กระตุกก้ามเนื้ออ่อนแรง หายใจลำบาก ปวดศีรษะ พิษเรื้อรัง : ยับยั้งเอ็นไซม์โคลีนเอสเตอเรส มีผลต่อ Testosterone Hormone ไม่เป็นสารก่อมะเร็ง

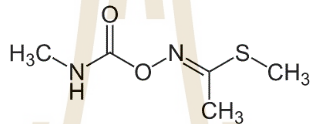
ตารางที่ 2.3 สมบัติความเป็นพิษของสารกำจัดศัตรูพืชที่ต้องเฝ้าระวัง 12 ชนิด (สำนักโรคจากการประกอบอาชีพและสิ่งแวดล้อม, 2556) (ต่อ)

ลำดับ	ชื่อสารเคมี	สมบัติความเป็นพิษ
8	เมทิดาธาออน (Methidathion)	พิษเฉียบพลัน : ทำให้ระคายเคืองผิวหนัง ทางเดินหายใจ และทางเดินอาหาร ยับยั้งเอ็นไซม์โคลีนเอสเตอเรส พิษเรื้อรัง : ยับยั้งเอ็นไซม์โคลีนเอสเตอเรส
9	เมโธมิล (Methomyl)	พิษเฉียบพลัน : ทำให้ระคายเคืองผิวหนัง ทางเดินหายใจ และทางเดินอาหาร ยับยั้งเอ็นไซม์โคลีนเอสเตอเรส มีผลต่อระบบประสาท ทำให้สั่น กระตุกก้ามเนื้ออ่อนแรง หายใจลำบาก ปวดศีรษะ พิษเรื้อรัง : ยับยั้งเอ็นไซม์โคลีนเอสเตอเรส ไม่เป็นสารก่อมะเร็ง
10	ออกซามิล (Oxamyl)	พิษเฉียบพลัน : ทำให้ระคายเคืองผิวหนัง ทางเดินหายใจ และทางเดินอาหาร ยับยั้งเอ็นไซม์โคลีนเอสเตอเรส
11	เอ็นโดซัลแฟน (Endosulfan)	พิษเฉียบพลัน : ทำให้ระคายเคืองผิวหนัง ทางเดินหายใจ และทางเดินอาหาร ยับยั้งเอ็นไซม์โคลีนเอสเตอเรส มีผลต่อระบบประสาท ทำให้สั่น กระตุกก้ามเนื้ออ่อนแรง หายใจลำบาก ปวดศีรษะ พิษเรื้อรัง : ยับยั้งเอ็นไซม์โคลีนเอสเตอเรส มีผลต่อทารกในครรภ์ ทำให้พิการแต่กำเนิด ปากแห้ง เพดานโหว่ ไม่เป็นสารก่อมะเร็ง
12	พาราธาออนเมทิล (Parathion Methyl)	พิษเฉียบพลัน : ทำให้ระคายเคืองผิวหนัง ทางเดินหายใจ และทางเดินอาหาร ยับยั้งเอ็นไซม์โคลีนเอสเตอเรส มีผลต่อระบบประสาท ทำให้สั่น กระตุกก้ามเนื้ออ่อนแรง หายใจลำบาก ปวดศีรษะ พิษเรื้อรัง : ยับยั้งเอ็นไซม์โคลีนเอสเตอเรส ตอบสนองช้า เดินละเมอ นอนหลับยาก พุดลำบาก ทำลายตับ มีผลอักเสบในกระเพาะอาหาร ไม่เป็นสารก่อมะเร็ง

2.2 เมโทมิล (Methomyl)

เมโทมิลเป็นสารเคมีในกลุ่มคาร์บาเมตที่ใช้ในการกำจัดแมลงศัตรูพืชในเกษตรกรรมมักใช้ในรูปของยาฆ่าแมลง เพื่อควบคุมและกำจัดแมลงซึ่งมีปริมาณการนำเข้าสูงและการใช้งานที่แพร่หลายแม้จะมีประสิทธิภาพในการควบคุมแมลงแต่เมโทมิลเป็นสารที่มีพิษรุนแรงและอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ ดังนั้นการใช้สารเมโทมิลต้องปฏิบัติตามคำแนะนำและข้อกำหนดที่กำหนดโดยหน่วยงานที่รับผิดชอบรวมถึงต้องใช้ในปริมาณและวิธีการที่ถูกต้อง เพื่อลดความเสี่ยงจากการใช้งานที่ไม่ปลอดภัย โดยเมโทมิลจัดเป็นสารเคมีกำจัดศัตรูพืชที่ต้องระมัดระวังและอยู่ในกลุ่ม 12 ชนิดที่ต้องให้ความสำคัญในการใช้งาน

2.2.1 คุณสมบัติทางเคมี

สูตรโมเลกุล	:	$C_5H_{10}N_2O_2S$
สูตรโครงสร้างทางเคมี	:	
ชื่อสามัญ	:	เมโทมิล (Methomyl)
ชื่อเคมี	:	N-[(Methyl-Carbamoyl)Oxy]-,MethylEster
จัดอยู่ในกลุ่ม	:	Carbamate Pesticide
ชื่อทางการค้า	:	ไมท์เอ็น (Mite end) สกาย ®(Sky ®) แลนเนท (Lannate) โพรมิล แลนเนท-แอล (Lannate-l) เอ็มโพลี (M-POLY) บีพีซ แซตมิลด์ 40 แคนโทมิล ไลอ้อนมาร์ค
น้ำหนักโมเลกุล	:	162.20 กรัมต่อโมล
สภาพทางฟิสิกส์	:	ผลึกของแข็ง สีขาว กลิ่นกรดซัลฟูริกอ่อน ๆ
จุดหลอมเหลว	:	ประมาณ 78-79 องศาเซลเซียส
การละลาย	:	ละลายน้ำได้ดี 57 กรัมต่อลิตร ที่ 20 องศาเซลเซียส (M. Tamimi et al., 2008)
ความหนาแน่น	:	ประมาณ 1.294 กรัมต่อมิลลิลิตร

2.2.2 การนำไปใช้ในทางการเกษตร

สารเมโทมิลมีข้อได้เปรียบสำคัญในแง่ของการทำลายศัตรูพืชที่มีความต้านทานต่อสารในกลุ่มออร์กาโนฟอสเฟต (Organophosphate) ซึ่งเป็นสารกำจัดศัตรูพืชประเภทหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสารเมโทมิลมีคุณสมบัติที่สามารถซึมเข้าสู่เนื้อเยื่อของพืชได้อย่างรวดเร็ว ทำให้สามารถกำจัดศัตรูพืชที่กินพืชจากภายในได้ นอกจากนี้การใช้อัตราสารที่เหมาะสมยังช่วยให้สารเมโทมิลมีประสิทธิภาพสูงสุดในการควบคุมศัตรูพืชและลดการสะสมในสิ่งแวดล้อมได้ อย่างไรก็ตาม องค์การอนามัยโลก (WHO) ได้ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการใช้สารเมโทมิลตั้งแต่ปี ค.ศ. 1976 ว่าควรใช้ในปริมาณที่เหมาะสมเพื่อความปลอดภัยและประสิทธิภาพสูงสุด โดยอัตราการใช้งานทั่วไปมักอยู่ในช่วง 0.25 ถึง 1 กิโลกรัมต่อไร่ ขึ้นอยู่กับประเภทของพืชและชนิดของศัตรูพืชที่ต้องการกำจัด (WHO, 1976)

ในสหรัฐอเมริกาการใช้สารเมโทมิลในการควบคุมศัตรูพืชมีการกำหนดคำแนะนำที่เฉพาะเจาะจงตามชนิดของพืชและประเภทของศัตรูพืชที่ต้องการกำจัด คำแนะนำเหล่านี้จัดทำโดยผู้ผลิตสารเคมีและหน่วยงานควบคุมโรคพืช เช่น องค์การปกป้องสิ่งแวดล้อมสหรัฐ (EPA) ที่ทำหน้าที่ประเมินความปลอดภัยและประสิทธิภาพของการใช้สารกำจัดแมลง โดยคำแนะนำจะอธิบายอัตราการใช้ที่เหมาะสมสำหรับพืชแต่ละชนิดและช่วงเวลาที่เหมาะสมในการพ่นสารเพื่อให้ได้ผลสูงสุด (WHO, 1976) แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 อัตราการใช้เมโทมิลกับพืชชนิดต่างๆ ตามคำแนะนำในประเทศสหรัฐอเมริกา (WHO, 1976)

ชนิดพืช	แมลงศัตรูพืช	อัตราการใช้ (กิโลกรัมต่อไร่)
ข้าวโพดหวาน	หนอนเจาะฝัก	0.3 – 0.5
	หนอนเจาะลำต้น	0.5
ฝ้าย	หนอนเจาะสมอฝ้าย	0.5 – 0.75
	หนอนเจาะยอดยาสูบ	
กะหล่ำปลี	หนอนคืบกะหล่ำ	0.25 – 1.0
	หนอนใยผัก	
มะเขือเทศ	หนอนเจาะผล เพลี้ยอ่อน	0.5
	หนอนคืบกะหล่ำ หนอนกระทู้ผัก	0.5 -1.0
แตงกวา	หนอนคืบกะหล่ำ	0.5 -1.0
ผักกาดหัว	หนอนคืบกะหล่ำ	0.25 – 0.5
	หนอนกระทู้ผัก	0.5 – 1.0
แตงโม	หนอนคืบกะหล่ำ เพลี้ยอ่อน	0.5 – 1.0
มันฝรั่ง	เพลี้ยจักจั่น ตัวงหมัดผัก	0.5
พริกไทย	เพลี้ยอ่อนพริกไทย	0.5
	หนอนคืบกะหล่ำ	
ถั่วเหลือง	หนอนเจาะฝัก หนอนกระทู้ผัก	0.25 – 0.5
	หนอนกินใบ	

2.2.3 การสลายตัวของเมโทมิล

การสลายทางเคมี (Hydrolysis) ของสารเมโทมิลเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นจากการแตกพันธะเอสเทอร์ (Ester bond) ซึ่งนำไปสู่การเกิดผลิตภัณฑ์หลัก ได้แก่ เมโทมิลออกซิม (Methomyl oxime) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Kuhr and Dorough 1976) อย่างไรก็ตามการสลายตัวของสารเมโทมิลผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิสในสภาพแวดล้อมธรรมชาติเกิดขึ้นได้ช้าและมีปริมาณน้อยจนและไม่มีผลกระทบ จากการศึกษาของงานวิจัยของ Malato et al. (2002) พบว่าสารละลายเมโทมิลที่ค่าความเป็นกรดต่าง 2.7 หรือ 5 ไม่มีการสลายตัวแม้จะผ่านไปเป็นเวลา 20 วัน นอกจากนี้งานวิจัยของ Tamimi M et al. (2006) พบว่าสารเมโทมิลมีความเสถียรที่ค่าความเป็นกรด

ต่างที่ 6 ซึ่งทั้งสองงานวิจัยสรุปได้ว่ากระบวนการไฮโดรไลซิสของสารเมโรมิลไม่เกิดขึ้นในสภาพแวดล้อมภายนอกห้องปฏิบัติการ

นอกจากนี้ในสภาวะที่มีคลอไรด์ไอออน (Cl^-) ซึ่งจำลองกระบวนการคลอรีเนชันของน้ำดื่ม อัตราการแตกตัวของสารเมโรมิลผ่านไฮโดรไลซิสอาจเปลี่ยนแปลงไปขึ้นกับค่าความเป็นกรดต่าง จากการศึกษาวิจัยของ Miles and Oshiro (1990) พบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรดต่าง ระหว่าง 7.6 และ 8.9 ทำให้ค่าครึ่งชีวิตของสารเมโรมิลเปลี่ยนแปลงถึง 30 เท่า โดยมีช่วงระหว่าง 0.4 ถึง 12 นาที และจากการศึกษาเพิ่มเติมค่าความเป็นกรดต่างที่ 7.3 พบว่าการสลายตัวของสารเมโรมิล เกิดผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้แก่ กรดอะซิติก (Acetic acid) กรดเมทาเนซัลโฟนิก (Methanesulfonic acid) และไดคลอโรเมทิลเอมีน (Dichloromethylamine) เป็นต้น ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาของ คลอรีนอิสระกับสารเมโรมิล นอกจากนี้อัตราการเกิดผลิตภัณฑ์จากการสลายตัวของเมโรมิลจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนและอุณหภูมิสูงขึ้น เมื่อพิจารณาจากค่าความเป็นกรดต่าง พบว่า ค่าความเป็นกรดต่างที่ใกล้เคียงกลาง ค่าความเป็นกรดต่าง ประมาณ 7 การเกิดปฏิกิริยา Sulfoxidation เป็นกระบวนการหลัก ในขณะที่ที่ค่าความเป็นกรดต่างสูงขึ้น การเกิด N-chlorination จะกลายเป็นกระบวนการหลักแทน

2.2.4 ค่ามาตรฐานการปนเปื้อนของสารเมโรมิลในสิ่งแวดล้อม

สารเมโรมิลเป็นสารเคมีกำจัดศัตรูพืชที่มีความเป็นพิษสูงและจำเป็นต้องมีการควบคุมอย่างเข้มงวดเพื่อป้องกันอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพมนุษย์ หน่วยงานต่างประเทศ เช่น สำนักงานคุ้มครองสิ่งแวดล้อมสหรัฐอเมริกา (EPA) ได้กำหนดค่าความปลอดภัยสำหรับสารตกค้างของสารเมโรมิลในอาหารและสิ่งแวดล้อมไว้ที่ 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งในประเทศไทยการควบคุมสารเมโรมิลอยู่ภายใต้พระราชบัญญัติวัตถุอันตราย พ.ศ. 2535 ซึ่งแบ่งวัตถุอันตรายออกเป็น 4 ประเภท สารเมโรมิลจัดอยู่ในประเภทที่ 3 ซึ่งหมายความว่า การผลิต นำเข้า ส่งออก หรือมีไว้ในครอบครองต้องได้รับอนุญาตจากกรมวิชาการเกษตรและสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา

อย่างไรก็ตามเนื่องจากความเป็นพิษสูงของเมโรมิลทำให้ประเทศไทยได้เสนอมีการห้าม การใช้สารในภาคเกษตรกรรมและครัวเรือน เพื่อป้องกันอันตรายต่อสุขภาพของประชาชน การควบคุมทางกฎหมายเกี่ยวกับสารเมโรมิลของแต่ละประเทศนั้น สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.5

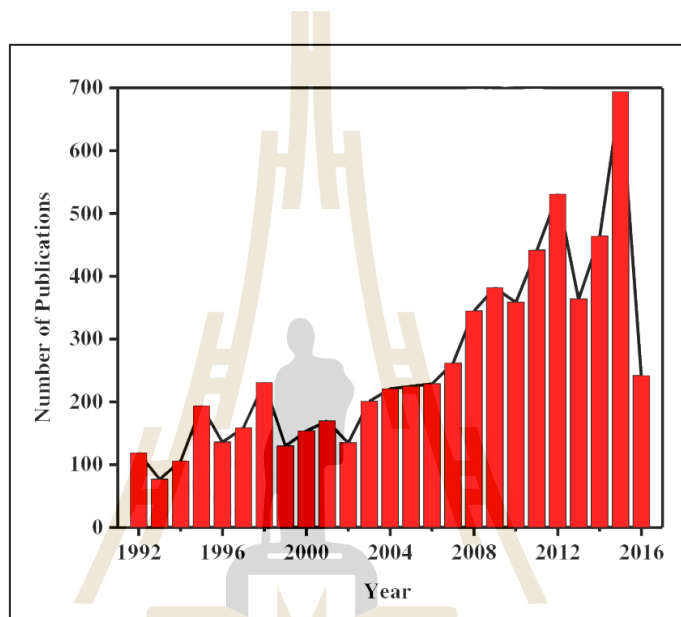
ตารางที่ 2.5 การควบคุมทางกฎหมายเกี่ยวกับสารเมไธมิลของแต่ละประเทศ (กรมควบคุมมลพิษ, 2541)

ประเทศ	รายละเอียดทางกฎหมายเกี่ยวกับสารเมไธมิลของ
ไทย	ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและการพลังงาน พ.ศ.2528 ได้กำหนดให้คุณภาพน้ำที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอุปโภคและการเกษตรกรรมมีค่าสารเคมีป้องกันกำจัดศัตรูพืชทุกชนิดตกค้างอยู่ได้ไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร
มาเลเซีย	ตามพระราชบัญญัติสารเคมีกำจัดศัตรูพืช ค.ศ.1974 ได้ประกาศห้ามมิให้มีการนำเข้า ห้ามผลิตและจำหน่าย ตลอดจนห้ามมีการใช้เมไธมิลภายในประเทศมาเลเซีย
ญี่ปุ่น	กำหนดให้สารเมไธมิลเป็นสารที่จะต้องขึ้นทะเบียนในการใช้เป็นสารกำจัดแมลงตามกฎหมายควบคุมสารเคมีที่ใช้ในการเกษตร ค.ศ.1983
อังกฤษ	อนุญาตให้เป็นสารที่ใช้ในการป้องกันกำจัดศัตรูพืชได้ แต่ต้องควบคุมเกี่ยวกับวิธีการใช้และความปลอดภัยในระหว่างการใช้งานอย่างเข้มงวด โดยกำหนดให้ผู้ใช้งานต้องสวมใส่เครื่องป้องกันอันตรายในระหว่างการใช้ทุก ๆ ครั้ง
แคนาดา	ออกกฎหมายกำหนดให้ความเข้มข้นสูงสุดที่จะไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อร่างกายในบรรยากาศการทำงานของเมไธมิลมีค่าเท่ากับ 2.5 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
บราซิล	ออกกฎหมายกำหนดให้ปริมาณที่ยอมให้มีได้ในผลิตผลจากพืชของเมไธมิลมีค่าอยู่ระหว่าง 0.1 – 3.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
เคนยา	ออกกฎหมายกำหนดให้ปริมาณสูงสุดของเมไธมิลที่มีได้ในผลิตภัณฑ์อาหารมีค่าอยู่ระหว่าง 0.1 – 5.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมัน	ออกกฎหมายกำหนดให้ปริมาณการตกค้างสูงสุดที่ยอมให้มีได้ของเมไธมิลในผลผลิตจากพืชมีค่าเท่ากับ 0.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
สหรัฐอเมริกา	ออกกฎหมายให้เมไธมิลเป็นสารที่ต้องจำกัดการใช้และจะต้องได้รับคำแนะนำเกี่ยวกับการใช้อย่างถูกต้องด้วย นอกจากนี้จะต้องเขียนที่ฉลากข้างขวดไว้ด้วยว่า สารกำจัดศัตรูพืชชนิดจำกัดการใช้

2.3 แอโรเจล (Aerogel)

คุณสมบัติสำคัญของแอโรเจลโดยทั่วไปเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างของแข็งที่มีรูพรุนสูง โดยมีอากาศหรือก๊าซเป็นองค์ประกอบหลักแทนที่ของเหลวที่เคยมีอยู่ในโครงสร้าง ซึ่ง IUPAC ให้นิยามแอโรเจลว่าเป็นเจลที่ประกอบด้วยของแข็งที่มีรูพรุนขนาดเล็กโดยมีเฟสที่กระจายตัวเป็นก๊าซ McNaught, A.D (2013) ซึ่งอธิบายไว้ว่าเป็นเจลที่ของเหลวถูกแทนที่ด้วยอากาศโดยที่โครงข่ายของแข็งหดตัวเพียงเล็กน้อย ซึ่งเป็นนิยามที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง Aegerter, M.A. (2011)

Steven Kistler (1931) ได้มีการพัฒนาแอโรเจลโดยเขาคิดค้นวิธีการผลิตแอโรเจลจากซิลิกา ที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบในรูปแบบของเจลจากนั้นแทนที่น้ำด้วยอากาศเพื่อรักษาโครงสร้างโปร่งแสง และน้ำหนักเบาของแอโรเจล อย่างไรก็ตามจากเหตุการณ์นี้ถือเป็นจุดเริ่มต้นของการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับแอโรเจลต่อมาการศึกษาเกี่ยวกับแอโรเจลได้รับความสนใจมากขึ้นและมีการพัฒนาแอโรเจลเรื่อย ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและเพิ่มการใช้งานในสาขาต่าง ๆ โดยในช่วงปี 1992 ถึง 2016 เริ่มมีการตีพิมพ์ งานวิจัยเกี่ยวกับแอโรเจลเพิ่มมากขึ้น (Maleki et al., 2016) แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 จำนวนงานเกี่ยวกับแอโรเจลที่ถูกตีพิมพ์ในแต่ละปีที่ผ่านมา (Maleki et al., 2016)

2.3.1 การจำแนกประเภทและสมบัติของแอโรเจล

แอโรเจลสามารถจำแนกได้หลายวิธีตามลักษณะทางกายภาพ โครงสร้างรูพรุน และองค์ประกอบทางเคมี โดยการจำแนกตามลักษณะที่ปรากฏสามารถพบได้ในรูปแบบของผง ฟิล์ม และแผ่นขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตและความต้องการสำหรับการใช้งาน นอกจากนี้แอโรเจลยังสามารถแบ่งตามโครงสร้างของรูพรุนได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ รูพรุนขนาดเล็ก (microporous) และรูพรุนขนาดกลาง (mesoporous) ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อสมบัติการดูดซับและการแยกสารเคมี (Keshavarz et al., 2021)

การจำแนกตามองค์ประกอบทางเคมีของแอโรเจลสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ แอโรเจล อนินทรีย์ (Inorganic Aerogel) ซึ่งสังเคราะห์จากวัสดุอนินทรีย์ เช่น ซิลิกา (Silica) และอลูมินา (Alumina) ที่มีคุณสมบัติเด่นด้านความทนทานต่อความร้อนและโครงสร้างที่แข็งแรง แอโรเจลอินทรีย์ (Organic Aerogel) ซึ่งสังเคราะห์จากวัสดุอินทรีย์ เช่น โพลีเมอร์หรือคาร์บอน ทำให้มีความยืดหยุ่นและน้ำหนักเบา เหมาะสำหรับการใช้งานในด้านต่าง ๆ เช่น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น และแอโรเจลลูกผสม (Inorganic-Organic Hybrid Aerogel) ที่เป็นการผสมผสานระหว่าง

วัสดุอินทรีย์และอินทรีย์เพื่อให้ได้คุณสมบัติพิเศษ เช่น ความทนทานสูง น้ำหนักเบา และสามารถปรับแต่งสมบัติเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานเฉพาะด้าน (Elkhatat et al., 2011)

ทั้งนี้ การจัดประเภทแอโรเจลถือเป็นพื้นฐานสำคัญในการวิจัยและพัฒนาวัสดุสำหรับการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม การแพทย์ และเทคโนโลยีสมัยใหม่ ซึ่งจะช่วยให้สามารถออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่มีประสิทธิภาพและตอบสนองความต้องการได้ดียิ่งขึ้น

2.3.2 เซลลูโลสแอโรเจล

เซลลูโลสเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของชีวมวลและพบได้อย่างแพร่หลายในของเสียทางการเกษตร (Zhangdi Li et al., 2019) โดยมีคุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีที่โดดเด่นหลายประการ เช่น ความสามารถในการดูดซับน้ำ ความสามารถของวัสดุในการทำงานร่วมกับระบบชีวภาพโดยไม่ก่อให้เกิดอันตรายและความไม่เป็นพิษ ซึ่งทำให้เซลลูโลสเป็นวัสดุที่มีศักยภาพสูงในการประยุกต์ใช้ด้านการดูดซับ (Syeda et al., 2022) ด้วยโครงสร้างเส้นใยที่เป็นเอกลักษณ์และการมีหมู่ฟังก์ชันที่หลากหลายบนพื้นผิว เซลลูโลสจึงถูกนำมาใช้ในการดูดซับด้วยปฏิกิริยาทางเคมี (Yu Liu et al., 2019)

นอกจากนี้เซลลูโลสแอโรเจลยังมีโครงสร้างที่ให้คุณสมบัติที่ดี ได้แก่ ความหนาแน่นต่ำ พื้นที่ผิวจำเพาะสูง และการนำไฟฟ้าต่ำ (Dong et al., 2023) ส่งผลให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ในหลากหลายสาขา เช่น การดูดซับ การเร่งปฏิกิริยา และไฟฟ้าเคมี เป็นต้น

ในการศึกษานี้เซลลูโลสแอโรเจลถูกสังเคราะห์ขึ้นจากเส้นใยเซลลูโลสที่สกัดได้จากชานอ้อย (Sugarcane Bagasse) ซึ่งเป็นของเสียทางการเกษตรที่มีองค์ประกอบหลักเป็นเซลลูโลสในปริมาณสูงประมาณประมาณร้อยละ 45 ถึง 55 (Rocha et al., 2011) ซึ่งชานอ้อยมักถูกกำจัดโดยวิธีการเผาทำลายหรือถูกนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจต่ำ อย่างไรก็ตาม การนำชานอ้อยมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตเซลลูโลสแอโรเจล นอกจากจะเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งแล้ว ยังช่วยลดปริมาณขยะที่ต้องนำไปกำจัดผ่านกระบวนการฝังกลบ ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางการพัฒนาอย่างยั่งยืนและการจัดการของเสียอย่างมีประสิทธิภาพ

2.3.3 กระบวนการสังเคราะห์แอโรเจล

กระบวนการสังเคราะห์แอโรเจลมีวิธีการขึ้นรูปหลายวิธี ได้แก่ วิธีการทำแห้งภายใต้สภาวะเหนือวิกฤต (Supercritical drying) วิธีการทำแห้งเยือกแข็ง (Freeze drying) และวิธีการทำแห้งด้วยแรงดันแวดล้อม (Ambient Pressure Drying) เป็นต้น ซึ่งแต่ละวิธีการขึ้นรูปมีกระบวนการแตกต่างกัน โดยวิธีการทำแห้งภายใต้สภาวะเหนือวิกฤตจะทำให้โครงสร้างที่เป็นโครงข่ายไม่ถูกทำลายและเจลจะถูกทำให้แห้งกลายเป็นแอโรเจลที่มีความพรุนสูง มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง และมีความหนาแน่นต่ำ อย่างไรก็ตามการสังเคราะห์ที่สภาวะอุณหภูมิและสภาวะความดันสูงดังกล่าวจะทำให้วิธีนี้เป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานมาก อันตราย และมีราคาแพง (Yu et al., 2016) อีกหนึ่งวิธีเป็นการทำแห้งเยือกแข็งโดยของเหลวเปียงจะถูกแช่แข็งต่อมาจึงทำให้แห้งโดยการระเหิดที่ละน้อยภายใต้แรงดันต่ำ วิธีการทำแห้งโดยเยือกแข็งจะใช้เวลานาน กระบวนการระเหิดนี้เป็นขั้นตอนที่ใช้เวลานานอาจมากกว่า 2 วัน และข้อเสียอีกประการของวิธีนี้เป็นการทำลายโครงสร้างเครือข่ายโดยการตกผลึกของของเหลวในรูปพรุน (Maleki et al., 2014) หากประยุกต์วิธีการนี้ไปใช้งานจริง จะต้องการอุปกรณ์ที่ซับซ้อนในการทำแห้งเยือกแข็งซึ่งไม่ใช่ทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับการผลิต

แอโรเจลในระดับอุตสาหกรรม ด้วยข้อจำกัดของสองวิธีการทำแห้งที่กล่าวมาข้างต้น วิธีการทำแห้งด้วยแรงดันแวดล้อมบรรยากาศเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ใช้เพื่อวัตถุประสงค์ทางอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นเทคนิคง่าย ๆ ที่ช่วยประหยัดพลังงาน วิธีการทำแห้งด้วยแรงดันแวดล้อมบรรยากาศนั้นปลอดภัย คุ่มค่าและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมซึ่งไม่ต้องการอุปกรณ์ที่ซับซ้อน วิธีการทำแห้งด้วยแรงดันแวดล้อมบรรยากาศเป็นวิธีการทำให้แห้งที่สามารถใช้ได้โดยเพียงแค่ปล่อยให้เจลอยู่ในสภาวะแวดล้อมของเหลวก็จะค่อย ๆ ระเหยไปในที่สุดและสร้างเครือข่ายที่แทรกซึมโดยอากาศ (Parale et al., 2018)

2.3.4 การประยุกต์ใช้แอโรเจลในด้านสิ่งแวดล้อม

แอโรเจลเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างรูพรุนสูง น้ำหนักเบา และมีสมบัติการดูดซับที่ดีเยี่ยม ทำให้มีศักยภาพในการประยุกต์ใช้ในด้านสิ่งแวดล้อมซึ่งแอโรเจลมีคุณสมบัติเฉพาะตัวจึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในด้านสิ่งแวดล้อม เช่น การกำจัดสารอินทรีย์ การกำจัดคราบน้ำมัน และการประยุกต์ใช้เป็นฉนวนกันความร้อน

2.3.4.1 การใช้แอโรเจลในการกำจัดสารอินทรีย์

แอโรเจลเป็นวัสดุดูดซับที่สามารถนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสารอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะแอโรเจลชีวภาพ ซึ่งเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและมีต้นทุนคุ่มค่า จึงได้รับความสนใจอย่างมาก นอกจากนี้ยังสามารถปรับแต่งพื้นผิวของแอโรเจลให้มีหมู่ฟังก์ชันที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับสารอินทรีย์ได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้งานวิจัยของ Ji et al. (2020) ศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาแอโรเจลจากนาโนไฟเบอร์เซลลูโลสที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและมีต้นทุนต่ำเพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับสำหรับกำจัดไอออนทองแดง (Cu^{2+}) และสารมลพิษอินทรีย์ในน้ำเสีย โดยใช้เซลลูโลสเป็นวัสดุหลักและปรับแต่งคุณสมบัติทางเคมีและโครงสร้างของแอโรเจล เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับ นอกจากนี้ยังได้ประเมินความสามารถในการกำจัดไอออนโลหะหนัก พบว่าแอโรเจลสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้หลายครั้งโดยไม่สูญเสียประสิทธิภาพ จึงเป็นทางเลือกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและมีศักยภาพสูงในการประยุกต์ใช้สำหรับการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งงานวิจัยของ Dilamian and Noroozi (2021) ศึกษาเกี่ยวกับการใช้เซลลูโลสแอโรเจลที่ได้จากฟางข้าวเป็นของเสียทางการเกษตรมาเป็นวัสดุสำหรับดูดซับสารมลพิษในน้ำ โดยออกแบบและพัฒนาแอโรเจลที่มีโครงสร้างเมโซพรอสและมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารปนเปื้อนอินทรีย์และน้ำมันจากน้ำ ผลการทดลอง พบว่าแอโรเจลที่พัฒนาขึ้นมีพื้นที่ผิวสูง ความพรุนและมีความสามารถในการดูดซับน้ำมันและสารอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของฟางข้าวในการนำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและสามารถนำไปใช้ในโรงงานบำบัดน้ำเสียได้ ดังนั้น แอโรเจลเป็นวัสดุดูดซับที่มีศักยภาพสูงในการกำจัดสารอินทรีย์ปนเปื้อนในน้ำเสีย อีกทั้งยังสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ ลดปริมาณของเสียและค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย และแอโรเจลจึงเป็นทางเลือกที่มีแนวโน้มดีสำหรับการบำบัดน้ำเสียที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถนำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรมได้ในอนาคต

2.3.4.2 การใช้แอโรเจลในการกำจัดคราบน้ำมัน

แอโรเจลที่มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) สามารถดูดซับน้ำมันจากแหล่งน้ำที่ปนเปื้อนได้ดี การพัฒนาเซลลูโลสแอโรเจลที่มีสมบัติดังกล่าวช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันรั่วไหลจากแหล่งน้ำ นอกจากนี้งานวิจัยของ Paulauskiene et al. (2020) ศึกษา

เกี่ยวกับคุณสมบัติและประสิทธิภาพของแอโรเจลที่พัฒนาจากเซลลูโลสสำหรับการดูดซับน้ำมันที่รั่วไหลในสิ่งแวดล้อม ซึ่งได้สังเคราะห์เซลลูโลสแอโรเจลผ่านกระบวนการตัดแปรทางเคมีและวิธีเป็นการทำแห้งเยือกแข็งเพื่อให้ได้โครงสร้างที่มีรูพรุนสูงและมีความสามารถในการดูดซับน้ำมันที่ดีจากการทดสอบ พบว่าแอโรเจลชนิดนี้สามารถดูดซับน้ำมันได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะน้ำมันที่มีความหนืดต่ำและน้ำมันดิบ ทั้งยังมีความสามารถในการรีไซเคิลและนำกลับมาใช้ใหม่หลายรอบ โดยที่ประสิทธิภาพไม่ลดลง ซึ่งเซลลูโลสร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดหลังจากผ่านการใช้งานซ้ำ 10 รอบ จากผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าเซลลูโลสแอโรเจลมีศักยภาพสูงในการใช้เป็นวัสดุดูดซับที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมสำหรับการแก้ปัญหา น้ำมันรั่วไหลในแหล่งน้ำได้ และงานวิจัยของ Cheng et al. (2017) ศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาแอโรเจลจากฝ้ายและเซลลูโลสฝ้ายที่ได้จากของเสียเพื่อนำมาใช้ในการกำจัดน้ำมันที่รั่วไหลในแหล่งน้ำโดยได้ออกแบบแอโรเจลให้มีโครงสร้างที่มีรูพรุนสูง น้ำหนักเบา และมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำแต่ชอบน้ำมัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำมัน ผลการทดลอง พบว่าแอโรเจลฝ้ายสามารถดูดซับน้ำมันได้มากถึง 99 ถึง 153 เท่าของน้ำหนักตัวเอง ในขณะที่แอโรเจลเซลลูโลสฝ้ายมีความสามารถในการดูดซับอยู่ที่ 86 ถึง 132 เท่า นอกจากนี้แอโรเจลที่พัฒนาขึ้นยังสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้หลายรอบโดยคงประสิทธิภาพเดิม ทำให้เป็นวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและมีศักยภาพสูงในการใช้สำหรับการบำบัดน้ำมันที่รั่วไหล

2.3.4.3 การใช้แอโรเจลในการผลิตฉนวนกันความร้อน

แอโรเจลสามารถใช้เป็นวัสดุฉนวนกันความร้อนในอาคารและโรงงานอุตสาหกรรม โดยเฉพาะเซลลูโลสแอโรเจล ซึ่งมีคุณสมบัติการนำความร้อนต่ำเป็นพิเศษ จึงช่วยลดการสูญเสียพลังงานและส่งเสริมการประหยัดพลังงานภายในอาคาร นอกจากนี้แอโรเจลยังมีความโปร่งแสงทำให้สามารถนำมาใช้เป็นฉนวนกันความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งงานวิจัยของ Quoc Ba Thaha et al. (2020) ศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาแอโรเจลจากเซลลูโลสที่สกัดจากชานอ้อยเพื่อใช้ในการกำจัดน้ำมันที่รั่วไหลและเป็นวัสดุฉนวนกันความร้อน ซึ่งได้ออกแบบแอโรเจลให้มีโครงสร้างที่มีรูพรุนสูง น้ำหนักเบา และมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำและชอบน้ำมัน ทำให้สามารถดูดซับน้ำมันได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง ผลการทดลอง พบว่าแอโรเจลที่พัฒนาขึ้นสามารถดูดซับน้ำมันได้หลายเท่าของน้ำหนักตัวและยังสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้หลายรอบและมีประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำมันสูงสุดถึง 25 กรัมต่อกรัม นอกจากนี้แอโรเจลยังมีค่าการนำความร้อนต่ำอยู่ในช่วง 0.031 ถึง 0.042 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน และมีค่าความพรุนต่ำอยู่ในช่วง 0.016-0.112 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งแสดงถึงศักยภาพในการเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี งานวิจัยนี้จึงแสดงให้เห็นว่าแอโรเจลจากชานอ้อยเป็นวัสดุที่มีศักยภาพสูงในการใช้เพื่อสิ่งแวดล้อมและอุตสาหกรรม

2.4 การสังเคราะห์สังกะสีประจุศูนย์

2.4.1 สังกะสีประจุศูนย์ (Zero Valent Zinc)

สังกะสี (Zinc) เป็นธาตุที่จัดอยู่ในกลุ่มโลหะทรานซิชัน (Transition Metal) และเป็นองค์ประกอบสำคัญในหมู่ที่ 12 ของตารางธาตุ โดยทั่วไปสังกะสีมักพบในสถานะออกซิเดชัน +2 ซึ่งเป็นสถานะที่เสถียรที่สุดของธาตุนี้ ในเชิงคุณสมบัติทางกายภาพสังกะสีในรูปของสารประกอบไอออนิกมักไม่มีสี แต่เมื่ออยู่ในรูปของของแข็ง เช่น ซิงค์ออกไซด์ หรือซิงค์ซัลไฟด์ มักมีลักษณะเป็นผง

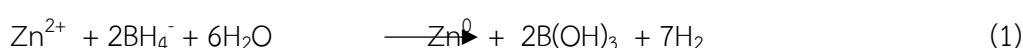
สีขาว ซึ่งแตกต่างจากโลหะทรานซิชันอื่นๆ ที่มีสถานะออกซิเดชัน +2 ซึ่งโดยทั่วไปแล้วมักแสดงสีที่แตกต่างกัน

โลหะที่มีค่าออกซิเดชันเป็นศูนย์ (Zerovalent metal, ZVM) เป็นสารรีดิวซ์ที่มีประสิทธิภาพสูงและถูกนำมาใช้ในการกำจัดสารปนเปื้อนจากยาฆ่าแมลงตั้งแต่ช่วงปลายทศวรรษ 1980 (Pourrezaei et al., 2014) ความสามารถในการรีดิวซ์ของ ZVM ทำให้มันกลายเป็นวัสดุที่ได้รับความสนใจในงานด้านวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม เนื่องจากมีความปลอดภัยสูงไม่ก่อให้เกิดพิษต่อสิ่งแวดล้อมและมีต้นทุนต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับสารรีดิวซ์ชนิดอื่น ๆ ทำให้ยังคงเป็นตัวเลือกที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งนักวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมนำไปใช้กันอย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำเสียและการกำจัดมลพิษทางเคมี (Ghauch et al., 2008)

นอกจากนี้มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับโลหะประจุศูนย์ชนิดอื่น ๆ เช่น เหล็กประจุศูนย์ (Zerovalent iron, Fe⁰) และสังกะสีประจุศูนย์ (Zerovalent Zinc, Zn⁰) โดยงานวิจัยนี้ศึกษาการใช้สังกะสีประจุศูนย์ซึ่งเป็นสารรีดิวซ์ที่มีศักยภาพสูงกว่าเหล็กประจุศูนย์ เนื่องจากสังกะสีประจุศูนย์มีค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน (E⁰ = -0.762 โวลต์) ซึ่งเป็นค่าลบมากกว่าเหล็กประจุศูนย์ (E⁰ = -0.441 โวลต์) ทำให้สังกะสีประจุศูนย์สามารถให้อิเล็กตรอนได้ง่ายกว่าและมีความสามารถในการรีดิวซ์สารมลพิษที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงได้ดีกว่า ด้วยเหตุนี้สังกะสีประจุศูนย์จึงได้รับความสนใจอย่างมากในฐานะตัวรีดิวซ์ทางเลือกที่สามารถนำไปใช้ในการกำจัดสารมลพิษที่มีโครงสร้างซับซ้อน เช่น สารประกอบฮาโลเจนและยาฆ่าแมลงประเภทออร์กาโนฟอสเฟต (Shah et al., 2019)

2.4.2 การสังเคราะห์สังกะสีประจุศูนย์

กระบวนการสังเคราะห์สังกะสีประจุศูนย์จะเกิดขึ้นโดยใช้ปฏิกิริยารีดอกซ์ระหว่างสารละลายไอออนสังกะสี (Zn²⁺) และสารรีดิวซ์ที่มีศักยภาพสูง เช่น โซเดียมโบโรไฮไดรด์ (NaBH₄) ในสถานะที่มีการควบคุมอย่างเหมาะสม โดยทั่วไปแล้วไอออนสังกะสีมักได้จากสารประกอบสังกะสี เช่น ZnCl₂ หรือ ZnSO₄ ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับ NaBH₄ ในสารละลายที่เป็นด่างจะเกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนทำให้ไอออนสังกะสีถูกรีดิวซ์เป็น สังกะสีประจุศูนย์ในรูปของอนุภาคขนาดนาโน ปฏิกิริยานี้มักต้องดำเนินการภายใต้สภาวะที่มีการไหลของก๊าซไนโตรเจน (N₂) อย่างต่อเนื่อง เพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชันของสังกะสีประจุศูนย์เป็นซิงค์ออกไซด์ซึ่งอาจลดประสิทธิภาพของอนุภาคที่เกิดขึ้นได้ ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมปัจจัยต่างๆ เช่น อัตราส่วนของสารตั้งต้น ค่าความเป็นกรดด่าง อุณหภูมิ และอัตราการเติมสารละลาย ซึ่งมีความสำคัญอย่างมากต่อขนาด รูปร่าง และคุณสมบัติทางเคมีของสังกะสีประจุศูนย์ที่สังเคราะห์ได้ ซึ่งกระบวนการนี้ได้รับความสนใจอย่างมากในด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและวัสดุนาโน เนื่องจากอนุภาคสังกะสีประจุศูนย์มีความสามารถสูงในการรีดักชันและกำจัดสารมลพิษทางน้ำ เช่น กำจัดสารกำจัดศัตรูพืชประเภทออร์กาโนคลอรีน (Cong et al., 2015) และสารประกอบอนินทรีย์ที่เป็นพิษ (Ahmad, H et al., 2014) ดังนั้นการพัฒนาเทคนิคการสังเคราะห์และการปรับแต่งคุณสมบัติของสังกะสีประจุศูนย์จึงเป็นหัวข้อที่ได้รับความสนใจในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุนาโนและเทคโนโลยีด้านสิ่งแวดล้อม ซึ่งสามารถแสดงดังสมการ 1

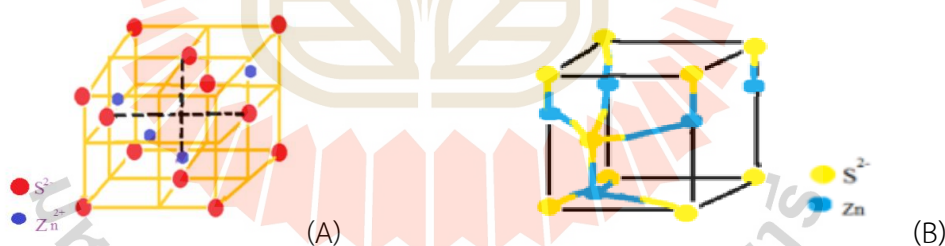


จากสมการที่ 1 ในกระบวนการนี้ไอออนสังกะสีที่ละลายในสารละลายจะถูกรีดิวซ์ให้เป็นสังกะสีประจุศูนย์ซึ่งไอออนสังกะสีที่อยู่ในสารละลายจะได้รับอิเล็กตรอนจาก NaBH_4 ซึ่งเป็นตัวรีดิวซ์ที่มีศักย์รีดอกซ์ต่ำ ทำให้สามารถปลดปล่อยอิเล็กตรอนเพื่อเปลี่ยนไอออนสังกะสีให้เป็นสังกะสีประจุศูนย์ได้ โดยไซเตียมโบโรไฮไดรด์ทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนแก่ไอออน Zn^{2+} ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจาก Zn^{2+} ไปเป็น Zn^0 ซึ่งอนุภาคสังกะสีประจุศูนย์ที่เกิดขึ้นมักจะมีขนาดเล็กเป็นผงสีเทาและสามารถออกซิไดซ์ได้ง่ายเมื่อสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ ดังนั้นกระบวนการสังเคราะห์มักดำเนินการในสภาวะที่มีการไหลของแก๊สไนโตรเจนอย่างต่อเนื่อง เพื่อป้องกันไม่ให้ออกซิเจนจากอากาศเข้าไปในระบบและทำให้เกิดซิงค์ออกไซด์ซึ่งอาจลดประสิทธิภาพของอนุภาคสังกะสีที่เตรียมได้

2.5 สังกะสีที่ดัดแปลงด้วยซัลไฟด์ (Sulfide modified Zinc, S-Zn)

ซิงค์ซัลไฟด์ (ZnS) เป็นวัสดุเซมิคอนดักเตอร์ที่มีแบนด์แก๊ปแบบโดยตรง (Direct Bandgap) ช่วงพลังงานที่อิเล็กตรอนไม่สามารถมีอยู่ในโครงสร้างของแข็ง ซึ่งได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวางในด้านวัสดุศาสตร์และนาโนเทคโนโลยี เนื่องจากมีคุณสมบัติทางแสงและอิเล็กทรอนิกส์ที่โดดเด่น ซิงค์ซัลไฟด์มีศักยภาพในการนำไปใช้ในหลายสาขา

ซิงค์ซัลไฟด์มักเป็นผงสีขาวหรือสีเหลืองอ่อนและเป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่พบได้ในธรรมชาติในสองรูปแบบผลึก ได้แก่ สฟาเลอไรต์ (Sphalerite) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกลูกบาศก์ มักพบในรูปแบบอนุกรมิต่ำและเวิร์ตไซต์ (Wurtzite) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกหกเหลี่ยมมักพบในรูปแบบคู่กันที่อุณหภูมิสูง โดยโครงสร้างเหล่านี้ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพ แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างผลึกของซัลไฟด์สฟาเลอไรต์ (A) และเวิร์ตไซต์ (B) (P. Asha et al., 2016)

ซิงค์ซัลไฟด์มีคุณสมบัติโดดเด่นหลายประการ ได้แก่ พื้นผิวมีขั้ว (Polar Surface) ทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาและการดูดซับได้ดีในซิงค์ซัลไฟด์ มีความเสถียรทำให้วัสดุสามารถทนต่ออุณหภูมิสูงได้โดยไม่เสื่อมสภาพง่ายและการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งช่วยให้สามารถพัฒนาอุปกรณ์ที่มีการตอบสนองรวดเร็วและมีประสิทธิภาพสูงขึ้น (Bian et al., 2016) คุณสมบัติที่โดดเด่นเหล่านี้ทำให้ซิงค์ซัลไฟด์สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพในเทคโนโลยีต่าง ๆ ได้แก่ การวัดและตรวจจับเซ็นเซอร์ (Sensors) ซิงค์ซัลไฟด์สามารถใช้งานได้ดีในเซ็นเซอร์ที่ต้องการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของแสงหรือสารเคมีต่าง ๆ (Zhang et al., 2017) ใช้เป็นตัวเร่ง

ปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalysis) สำหรับการบำบัดน้ำเสียและการผลิตพลังงานสะอาด โดยใช้แสงในการกระตุ้นปฏิกิริยาเคมีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Ranjith et al., 2017) เป็นต้น

นอกจากซัลไฟด์ที่ได้รับการปรับปรุงด้วยสังกะสีประจุศูนย์แล้วยังมีการศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติของซัลไฟด์ด้วยโลหะอื่น ๆ อีกหลายชนิด เช่น ซัลไฟด์ที่ปรับปรุงด้วยเหล็กประจุศูนย์ (Sulfide modified Zerovalent Iron, S-ZVI) ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุในการดูดซับหรือเร่งปฏิกิริยาเคมี ซัลไฟด์ที่ปรับปรุงด้วยเหล็กประจุศูนย์มีความสามารถในการดูดซับที่แข็งแกร่งกว่าและมีประสิทธิภาพในการกำจัดคลอรีนที่ดีกว่าเหล็กประจุศูนย์ (Dong et al., 2018) เนื่องจากการเคลือบหรือปรับปรุงพื้นผิวของซัลไฟด์ที่ปรับปรุงด้วยเหล็กประจุศูนย์ช่วยลดอัตราการเกิดออกซิเดชันที่ไม่พึงประสงค์และเพิ่มความเสถียรของวัสดุในสภาพแวดล้อมที่มีออกซิเจน นอกจากนี้ซัลไฟด์ยังสามารถเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ของเหล็กประจุศูนย์ทำให้มีศักย์รีดอกซ์ที่เหมาะสมขึ้นและสามารถปล่อยอิเล็กตรอนอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ส่งผลให้อัตราการรีดักชันของสารประกอบคลอรีนเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ซัลไฟด์ที่ปรับปรุงด้วยเหล็กประจุศูนย์ยังสามารถดูดซับสารปนเปื้อนอินทรีย์ที่มีคลอรีนได้ดีขึ้นผ่านปฏิกิริยาเคมีและแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตซึ่งช่วยเพิ่มอัตราการย่อยสลายของสารมลพิษและในบางกรณียังสามารถกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาร่วมกับตัวรับอิเล็กตรอนได้ เช่น ซัลไฟด์และเหล็กไอออนิกซึ่งช่วยเร่งกระบวนการกำจัดคลอรีนให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นกว่า เหล็กประจุศูนย์ (Qiong et al., 2020) ซึ่งอนุภาคซัลไฟด์ที่ปรับปรุงด้วยเหล็กประจุศูนย์มีแนวโน้มเกาะกลุ่มกันเนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคขนาดเล็กซึ่งลดพื้นที่ผิวที่สามารถสัมผัสกับสารปนเปื้อนโดยตรง (Zhang et al., 2018) ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดมลพิษลดลง ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้ด้วยการปรับปรุงวิธีการสังเคราะห์ เช่น การเติมสารลดแรงตึงผิวหรือการใช้วัสดุรองรับเพื่อช่วยกระจายอนุภาคและลดการเกาะกลุ่ม อีกทั้งการปรับปรุงสมบัติของพื้นผิว เช่น การควบคุมอัตราส่วนของซัลไฟด์ต่อเหล็กหรือการใช้เทคนิคการห่อหุ้มยังช่วยเพิ่มการกระจายตัวของซัลไฟด์ที่ปรับปรุงด้วยเหล็กประจุศูนย์ในสารละลายและเสริมประสิทธิภาพในการกำจัดมลพิษอินทรีย์ได้ดียิ่งขึ้น

2.6 กระบวนการออกซิเดชันด้วยสารเปอร์ซัลเฟต

กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Processes, AOPs) ได้รับความสนใจอย่างมากในปัจจุบันเนื่องจากมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียและกำจัดสารพิษในน้ำ อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินการนี้มักมีต้นทุนต่ำและไม่ซับซ้อน อีกทั้งยังสามารถกำจัดสารมลพิษได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง (Anirudhan et al., 2017) กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงใช้การสร้างอนุมูลอิสระที่มีประจุสูง เช่น อนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ($\cdot\text{OH}$) ซึ่งสามารถทำลายสารเคมีที่เป็นอันตรายหรือสารอินทรีย์ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ง่ายในสภาพแวดล้อมธรรมชาติ โดยปฏิกิริยาออกซิเดชันนี้มีความเร็วสูงและสามารถใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากแหล่งต่าง ๆ ได้ดีโดยเฉพาะในกรณีที่สารพิษมีความเข้มข้นสูงหรือยากต่อการย่อยสลายด้วยวิธีการธรรมดา เช่น น้ำเสียจากอุตสาหกรรมเคมีและการเกษตร กระบวนการนี้ยังช่วยลดสารพิษที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติและช่วยฟื้นฟูคุณภาพน้ำให้สะอาดขึ้นตามมาตรฐานการใช้งาน

สารเปอร์ซัลเฟต (Persulfate , PS , $S_2O_8^{2-}$) เป็นสารประกอบออกซิไดซ์ที่มีคุณสมบัติเด่นในด้านความเสถียรซึ่งมันสามารถคงตัวได้ดีในสภาวะแวดล้อมทั่วไปโดยไม่สลายตัวเองอย่างง่ายตาย โดยเฉพาะที่อุณหภูมิห้องและในน้ำ ซึ่งเปอร์ซัลเฟตสามารถแตกตัวและปลดปล่อยอนุมูลอิสระซัลเฟต ($SO_4^{\bullet-}$) ออกมาได้ เมื่อได้รับการกระตุ้นอย่างเหมาะสม (Monteagudo et al., 2015) ดังนั้นเปอร์ซัลเฟตจึงมีความน่าสนใจในการประยุกต์ใช้ด้านการบำบัดน้ำเสียและการเร่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ถึงแม้ว่าเปอร์ซัลเฟตจะมีความเสถียรในสภาพแวดล้อมทั่วไปแต่สามารถถูกกระตุ้นให้สลายตัวเพื่อสร้างอนุมูลอิสระซัลเฟตได้ผ่านกระบวนการต่าง ๆ ได้แก่ การกระตุ้นด้วยความร้อนซึ่งอุณหภูมิสูงจะช่วยเร่งการแตกตัวของพันธะในโมเลกุลของเปอร์ซัลเฟตทำให้เกิด ($SO_4^{\bullet-}$) นอกจากนี้การกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) ก็สามารถทำให้เปอร์ซัลเฟตแตกตัวได้เช่นกัน โดยแสง UV จะให้พลังงานเพียงพอในการทำลายพันธะเคมีและกระตุ้นการเกิดอนุมูลอิสระซัลเฟต อีกทั้งโลหะทรานซิชัน (Transition Metals) เช่น Fe^{2+} Mn^{2+} และ Zn^{2+} ยังสามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อกระตุ้นเปอร์ซัลเฟตได้ผ่านกระบวนการรีดอกซ์ ซึ่งจะทำให้เปอร์ซัลเฟตแตกตัวและปลดปล่อยอนุมูลอิสระซัลเฟตออกมาเพื่อใช้ในการออกซิเดชันของสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย แสดงดังสมการ 2 ถึง 3



การใช้อนุมูลอิสระซัลเฟตได้รับการพิจารณาว่าเป็นหนึ่งในวิธีที่มีประสิทธิภาพในกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงเพื่อกำจัดสารปนเปื้อนอินทรีย์ในน้ำเสีย โดยเฉพาะสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยากซึ่งอนุมูลอิสระซัลเฟตสามารถทำปฏิกิริยาออกซิเดชันที่มีความรุนแรงสูงและมีประสิทธิภาพในการทำลายสารพิษที่ไม่สามารถกำจัดได้ด้วยกระบวนการธรรมดาได้อย่างดีเยี่ยม ในแง่ของการออกซิเดชันอนุมูลอิสระซัลเฟต ($E = 2.6$ โวลต์) มีศักยภาพการออกซิเดชันที่สูงและใกล้เคียงกับอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลมีศักยภาพการออกซิเดชัน คือ ($E = 2.8$ โวลต์) ซึ่งเป็นอนุมูลอิสระที่มีความสามารถในการทำลายสารพิษที่ดีที่สุด (Li et al., 2014) การใช้อนุมูลอิสระซัลเฟตจึงสามารถทำให้กระบวนการบำบัดน้ำเสียมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยเฉพาะในกรณีที่ต้องการกำจัดสารอินทรีย์ที่มีความคงทนสูงหรือสารปนเปื้อนที่ย่อยสลายได้ยาก ซึ่งอนุมูลอิสระซัลเฟตนอกจากจะมีศักยภาพในการออกซิเดชันสูงแล้วยังมีคุณสมบัติที่ทำให้มันมีประสิทธิภาพมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลเมื่ออยู่ในสภาวะกรดอนุมูลอิสระซัลเฟตจะมีโอกาสออกซิไดซ์สารประกอบอินทรีย์ได้มากกว่าเนื่องจากการเกิดอนุมูลอิสระนี้จะเพิ่มขึ้นในสภาวะที่เป็นกรด อนุมูลอิสระซัลเฟตจึงมีความสามารถในการทำลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้ดีกว่าในสภาวะที่เป็นกลางหรือเป็นด่าง ซึ่งทำให้มันเหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสียที่มีค่าความเป็นกรดต่างต่ำหรือในกรณีที่ต้องการการออกซิเดชันในสภาวะกรด (Rahmani et al., 2016)

กลไกการกระตุ้นเปอร์ซัลเฟตด้วยสังกะสีประจุศูนย์อาศัยปฏิกิริยารีดอกซ์บนพื้นผิวของสังกะสีประจุศูนย์ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ เพื่อถ่ายโอนอิเล็กตรอนไปยังเปอร์ซัลเฟตทำให้เกิดการสลายพันธะ S-O และสร้างอนุมูลอิสระซัลเฟตที่มีศักยภาพออกซิเดชันสูง สังกะสีประจุศูนย์เป็นวัสดุที่มีศักยภาพในการรีดักชันสูงซึ่งสามารถให้อิเล็กตรอนได้ง่ายและมีความสามารถในการลดสารปนเปื้อน

ต่าง ๆ ได้ดี ซึ่งกระบวนการย่อยสลายสารปนเปื้อนโดยใช้สังกะสีประจุศูนย์สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งทางตรงและทางอ้อม โดยกระบวนการย่อยสลายโดยตรงจะเกิดขึ้นเมื่อสังกะสีประจุศูนย์ให้อิเล็กตรอนให้กับสารปนเปื้อนทำให้สารเหล่านั้นถูกรีดิวซ์เป็นรูปที่มีความเป็นพิษน้อยลงหรือไม่เป็นพิษ ในขณะที่กระบวนการย่อยสลายทางอ้อมจะเกี่ยวข้องกับการสร้างอนุมูลอิสระที่มีปฏิกิริยาสูง เช่น อนุมูลอิสระซูเปอร์ออกไซด์ ($O_2^{\cdot-}$) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อสังกะสีประจุศูนย์ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่ละลายในน้ำ โดยอนุมูลซูเปอร์ออกไซด์นี้สามารถทำปฏิกิริยาต่อไปเพื่อเร่งการสลายตัวของสารอินทรีย์ที่เป็นมลพิษได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ปฏิกิริยาดังกล่าวยังสามารถส่งเสริมการเกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลซึ่งมีศักยภาพสูงในการออกซิไดส์สารปนเปื้อนอินทรีย์ ทำให้สังกะสีประจุศูนย์เป็นวัสดุที่มีศักยภาพสูงสำหรับการบำบัดน้ำเสียและการกำจัดสารปนเปื้อนที่ย่อยสลายได้ยากในสิ่งแวดล้อม (Wen G et al., 2014) สังกะสีประจุศูนย์เป็นสารรีดักชันที่แข็งแกร่งกว่า ($E = -0.76$ โวลต์) มากกว่าเหล็กประจุศูนย์ ($E = -0.45$ โวลต์) ดังนั้นจึงสามารถเป็นตัวกระตุ้นเปอร์ซัลเฟตได้ดีกว่า นอกจากนี้ปฏิกิริยาระหว่างสังกะสีประจุศูนย์และน้ำสามารถก่อให้เกิดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลซึ่งเป็นตัวออกซิแดนซ์ที่มีพลังงานสูงและสามารถเร่งกระบวนการย่อยสลายได้ (Guo et al., 2017) แสดงดังสมการ 4 ถึง 6



นอกจากนี้งานวิจัยของ Hao et al. (2020) ศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพของโลหะที่มีค่าความเป็นศูนย์ ได้แก่ เหล็กประจุศูนย์ สังกะสีประจุศูนย์ และ อะลูมิเนียมประจุศูนย์ โดยการกระตุ้นด้วยเปอร์ซัลเฟต เพื่อย่อยสลายยาไซโปรฟลอกซาซิน (Ciprofloxacin) ในน้ำ ผ่านกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงโดยศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ เช่น ประเภทโลหะ ปริมาณสารเคมี ค่าความเป็นกรดต่าง และอุณหภูมิที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดยาไซโปรฟลอกซาซิน นอกจากนี้ยังวิเคราะห์กลไกการเกิดอนุมูลอิสระ เช่น อนุมูลอิสระซัลเฟต และอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลผ่านเทคนิคเชิงวิเคราะห์ต่าง ๆ ซึ่งผลการทดลอง พบว่าสังกะสีประจุศูนย์กระตุ้นเปอร์ซัลเฟตมีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดไซโปรฟลอกซาซิน รองลงมาคือเหล็กประจุศูนย์กระตุ้นเปอร์ซัลเฟตและอะลูมิเนียมประจุศูนย์กระตุ้นเปอร์ซัลเฟต โดยสังกะสีประจุศูนย์สามารถเร่งการสลายตัวด้วยเปอร์ซัลเฟต เพื่อสร้างอนุมูลออกซิแดนซ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพในสภาวะที่เป็นกรดอ่อนถึงเป็นกลาง จากการศึกษาข้างชี้ให้เห็นถึงกลไกที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายโอนอิเล็กตรอนจากโลหะไปยังเปอร์ซัลเฟตรวมถึงผลของการเกิดออกไซด์หรือไฮดรอกไซด์บนผิวโลหะที่อาจลดประสิทธิภาพการทำงานในระยะยาว ดังนั้นงานวิจัยนี้เสนอแนวทางการบำบัดน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพโดยใช้โลหะประจุศูนย์ซึ่งกระตุ้นเปอร์ซัลเฟตเพื่อย่อยสลายยาไซโปรฟลอกซาซินอย่างมีประสิทธิภาพและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้งานวิจัยของ Ying Li et al. (2014) ศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมคองโกเรด (Congo Red; CR) ในน้ำด้วยกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงโดยใช้สังกะสีประจุศูนย์ในการกระตุ้นเปอร์ซัลเฟตซึ่งมีการศึกษาตามปัจจัยต่าง ๆ เช่น ปริมาณสังกะสีประจุศูนย์ ปริมาณเปอร์ซัลเฟต ค่าความเป็นกรดต่าง และ

อุณหภูมิที่มีผลต่อการย่อยสลายสีย้อม ผลการทดลอง พบว่าสังกะสีประจุศูนย์สามารถกระตุ้นเปอร์ซัลเฟตให้เกิดอนุมูลอิสระซัลเฟตซึ่งเป็นสารออกซิแดนซ์ที่มีพลังงานสูงและสามารถย่อยสลายคองโกเรดได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยประสิทธิภาพการย่อยสลายเพิ่มขึ้นเมื่อใช้สภาวะที่เป็นกรดอ่อน อุณหภูมิสูง และมีปริมาณสังกะสีประจุศูนย์และเปอร์ซัลเฟตที่เหมาะสม นอกจากนี้ยังพบว่าอนุมูลอิสระซัลเฟตมีบทบาทสำคัญในกลไกการย่อยสลายมากกว่าอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลซึ่งจะเห็นได้ว่าสังกะสีประจุศูนย์เป็นตัวกระตุ้นเปอร์ซัลเฟตมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อมคองโกเรด และสามารถประยุกต์ใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

ดังนั้นสังกะสีประจุศูนย์เป็นตัวกระตุ้นเปอร์ซัลเฟตที่มีประสิทธิภาพสูงในการย่อยสลายทั้งสารปนเปื้อนประเภทสารอินทรีย์ โดยสามารถสร้างอนุมูลออกซิแดนซ์ที่มีพลังงานสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ทำให้สังกะสีประจุศูนย์เป็นตัวกระตุ้นเปอร์ซัลเฟตที่มีศักยภาพในการประยุกต์ใช้จริงในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย

2.7 จลนพลศาสตร์การดูดซับ

สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับที่นิยมกันอย่างแพร่หลายคือ สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (pseudo-first order) และอันดับสองเทียม (pseudo-second order) ซึ่งเป็นสมการจลนพลศาสตร์ที่ใช้อธิบายการดูดซับที่ผิวของสารดูดซับ นอกจากนี้ยังพบขั้นตอนการแพร่ภายในรูพรุนของสารดูดซับมีส่วนสำคัญในขั้นตอนการดูดซับ ดังนั้นสมการการแพร่ภายในรูพรุนจึงเป็นอีกสมการจลนพลศาสตร์ที่ถูกนำมาใช้อธิบายจลนพลศาสตร์การดูดซับ

2.7.1 สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม

จากสมมติฐานการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับเป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างผิวตัวดูดซับกับโมเลกุลตัวถูกดูดซับและการดูดซับเป็นการดูดซับทางเคมี สามารถคำนวณหาอัตราเร็วในการดูดซับได้โดยใช้สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับของ Lagergren จากปฏิกิริยาการดูดซับ แสดงดังสมการ 7



โดยที่ A คือ ตัวดูดซับ (adsorbate) และ S คือตัวดูดซับ (adsorbent) และ A*S คือ สารประกอบที่เกิดจากการดูดซับ (adsorbed compound) สามารถเขียนสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม แสดงดังสมการ 8

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (8)$$

โดยที่	k	คือ	ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (นาที่ ⁻¹)
	q _t	คือ	ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	q _e	คือ	ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

เมื่ออินทิเกรตสมการ 7 โดยมีขอบเขตตั้งแต่ $t=0$ จนถึง $t=t$ และตั้งแต่ $q_t=0$ จนถึง $q_t=t$ แสดงดังสมการ 9

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

จัดสมการให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้น จะได้ดังแสดงดังสมการ 10

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad (10)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log(q_e - q_t)$ กับ t จะได้ความชันเท่ากับ $-\frac{k_1}{2.303}$ และได้จุดตัดแกน y เท่ากับ $\log q_e$

แบบจำลองปฏิกิริยาลำดับหนึ่งเทียมใช้อธิบายปฏิกิริยาที่อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของสารขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้นเพียงตัวเดียว เช่น การสลายตัวของสารอินทรีย์ในระบบบอออกซิเดชันขั้นสูง การสลายตัวของสารปนเปื้อนทางชีวภาพ และการดูดซับสารมลพิษเมื่อพื้นผิวของวัสดุดูดซับมีความสามารถในการดูดซับต่ำหรือไม่มีผลของการจับตัวกันของโมเลกุลในสารละลาย โดยแบบจำลองนี้สามารถใช้ในการอธิบายการสลายตัวของสารอินทรีย์ในกระบวนการทางเคมีหรือทางชีวภาพ เช่น การย่อยสลายของสารกำจัดศัตรูพืชหรือการสลายตัวของยาปฏิชีวนะในน้ำเสีย

2.7.2 สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

สมการจลนพลศาสตร์สำหรับอธิบายการดูดซับบนผิวตัวดูดซับที่นิยมอีกสมการหนึ่งคือ สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียมบนสมมติฐานการดูดซับของตัวถูกดูดซับเป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าและเป็นการดูดซับทางเคมีที่มีผลมาจากตำแหน่งการเกิดปฏิกิริยา จากปฏิกิริยาการดูดซับแสดงดังสมการ 11



สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียมสามารถเขียนอัตราเร็วการดูดซับได้ดังแสดงดังสมการ 12

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad (12)$$

โดยที่ k คือ ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง (นาที่⁻¹)
เมื่ออินทิเกรตสมการ 12 โดยมีขอบเขตตั้งแต่ $t=0$ จนถึง $t=t$ และตั้งแต่ $q_t=0$ จนถึง $q_t=t$ แสดงดังสมการ 13

$$\frac{1}{q_e - q_t} = \frac{1}{q_e} - k_2 t \quad (13)$$

จัดสมการให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้น จะแสดงดังสมการ 14

$$\frac{1}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (14)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $1/q_t$ กับ t จะได้ความชันเท่ากับ $1/q_e$ และได้จุดตัดแกน y เท่ากับ $1/k_2 q_e^2$
แบบจำลองปฏิกิริยาลำดับสองที่นิยมมักใช้ในระบบที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้นสองชนิดหรือมีผลของการจับตัวกันระหว่างโมเลกุลในสารละลาย เช่น ปฏิกิริยาระหว่างสารปนเปื้อนกับสารออกซิแดนท์ หรือการดูดซับที่เกี่ยวข้องกับแรงระหว่างโมเลกุล เช่น กระบวนการดูดซับที่มีการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างสารมลพิษและพื้นผิวของตัวดูดซับ โดยทั่วไปแล้วแบบจำลองปฏิกิริยาลำดับที่สองจะถูกนำมาใช้ในกระบวนการที่มีการควบคุมอัตราโดยปัจจัยสองตัว เช่น การเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารปนเปื้อนกับตัวเร่งปฏิกิริยาในน้ำเสีย หรือการเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เอนไซม์ในกระบวนการทางชีวเคมี

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.8.1 การปรับสภาพของเสียเซลลูโลส

จากการทบทวนวรรณกรรม พบว่าการนำของเสียเซลลูโลสมาปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมี การนำของเสียเซลลูโลสมาปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมีเป็นวิธีที่สำคัญในการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของเซลลูโลสที่มาจากวัสดุเหลือใช้ในทางการเกษตร ได้แก่ ฟ้าย ชานอ้อย ฟางข้าว เปลือกข้าวโพด เป็นต้น ซึ่งปรับสภาพเพื่อเพิ่มมูลค่าและประสิทธิภาพต่อการใช้งาน โดยการใช้สารเคมีหลายชนิด เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมคลอไรด์ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ กรดซัลฟิวริก เป็นต้น เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกและสารประกอบที่ไม่ต้องการออกจากเซลลูโลส และเพิ่มประสิทธิภาพในโครงสร้างของเซลลูโลสให้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ดีขึ้น ซึ่งในงานวิจัยของ กนกวรรณ มหารัชมงคล (2558) ศึกษาการปรับสภาพจากฟางข้าวเพื่อสกัดเซลลูโลสโดยใช้สารเคมี ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 5 (น้ำหนักต่อปริมาตร) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 30 (ปริมาตรต่อปริมาตร) ภายใต้สภาวะควบคุม อุณหภูมิที่ใช้สำหรับกระบวนการ โซเดียมไฮดรอกไซด์และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อยู่ที่ 80 องศาเซลเซียส โดยทำปฏิกิริยานาน 120 นาที และ 60 นาที ตามลำดับ กระบวนการนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อทำลายและสกัดแยกลิกนินและเฮมิเซลลูโลสออกจากฟางข้าว ทำให้สามารถสกัดเซลลูโลสที่มีความบริสุทธิ์สูงขึ้นได้ ผลการทดลองพบว่าค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายเพิ่มขึ้นหลังจากการบำบัดด้วยสารละลายต่าง ซึ่งบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพของ NaOH ในการละลายสารประกอบลิกนิน นอกจากนี้การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวออกซิไดซ์ช่วยเสริมให้สามารถแยกสลายลิกนินและเฮมิเซลลูโลสได้อย่างสมบูรณ์มากขึ้น ผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการนี้ชี้ให้เห็นว่าสามารถใช้เทคนิคการปรับสภาพดังกล่าวเพื่อเตรียมเซลลูโลสจากฟางข้าวสำหรับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น การผลิตวัสดุชีวภาพ

และแอโรเจลเซลลูโลส และในงานวิจัยของ Theamdee et al. (2023) ศึกษาการปรับสภาพเยื่อเซลลูโลสจากชานอ้อยผ่านกระบวนการทางเคมี โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 20 (น้ำหนักต่อปริมาตร) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 25 (ปริมาตรต่อปริมาตร) เพื่อกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลสที่มีอยู่ในชานอ้อย กระบวนการปรับสภาพนี้ทำให้เกิดการแตกโครงสร้างทางเคมีของชานอ้อย ส่งผลให้เซลลูโลสที่ได้มีความบริสุทธิ์สูงขึ้น และเหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านวัสดุศาสตร์และอุตสาหกรรมต่าง ๆ แม้ว่ารายละเอียดเกี่ยวกับอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาจะไม่ได้ถูกระบุไว้อย่างชัดเจน แต่ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในปริมาณที่เหมาะสมสามารถทำให้ลิกนินและเฮมิเซลลูโลสแตกตัวออกจากโครงสร้างของชานอ้อยได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญในการเตรียมวัสดุเซลลูโลสที่มีคุณภาพสูงและพร้อมต่อการใช้งานในอุตสาหกรรม นอกจากนี้งานวิจัยของ Melesse et al. (2022) ศึกษาการปรับสภาพเยื่อเซลลูโลสจากชานอ้อยผ่านกระบวนการบำบัดทางเคมีโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 4 ที่อุณหภูมิสูงถึง 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที เพื่อกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลส ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ลดคุณสมบัติของเซลลูโลสและจำเป็นต้องถูกกำจัดออกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งาน กระบวนการนี้ช่วยทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างเซลลูโลสในชานอ้อย พบว่าหลังจากกระบวนการปรับสภาพแล้วโครงสร้างภายในของชานอ้อยมีการเปลี่ยนแปลง โดยพบว่ามี การแตกตัวของเส้นใยเซลลูโลส ทำให้วัสดุมีความพรุนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การศึกษาแสดงให้เห็นว่าการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นเหมาะสมสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติของเซลลูโลสได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่ทำให้เส้นใยเซลลูโลสเสียโครงสร้างมากเกินไป และในงานวิจัยของ Quoc Ba Thaha et al. (2020) ศึกษาการปรับสภาพเยื่อเซลลูโลสจากชานอ้อยผ่านกระบวนการทางเคมี โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 1 (น้ำหนักต่อปริมาตร) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 10 (ปริมาตรต่อปริมาตร) ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที เพื่อลดปริมาณสารปนเปื้อน เช่น ลิกนิน และเฮมิเซลลูโลส ออกจากเซลลูโลสที่สกัดได้ กระบวนการปรับสภาพนี้ช่วยเพิ่มค่าความแตกต่างของสารละลายซึ่งมีบทบาทสำคัญในการสลายพันธะทางเคมีที่ยึดลิกนินและเฮมิเซลลูโลสให้ติดอยู่กับโครงสร้างเซลลูโลส ทำให้สามารถกำจัดสารเหล่านี้ออกจากโครงสร้างของชานอ้อยได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลการทดลอง พบว่าหลังจากการปรับสภาพแล้ว เซลลูโลสที่ได้มีความบริสุทธิ์สูงขึ้น ลดการปนเปื้อนของลิกนิน และมีโครงสร้างที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานต่อไป โดยเฉพาะในกระบวนการผลิตวัสดุชีวภาพ เช่น แอโรเจล งานวิจัยนี้จึงแสดงให้เห็นว่าการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในปริมาณที่เหมาะสมสามารถช่วยให้เกิดการปรับโครงสร้างของเซลลูโลสจากชานอ้อยให้มีคุณภาพดีขึ้น ทำให้สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมที่ต้องการเซลลูโลสบริสุทธิ์สูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นการศึกษาการปรับสภาพของเยื่อเซลลูโลสด้วยกระบวนการทางเคมี ซึ่งมีการรวบรวมงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องแสดงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 การปรับสภาพของเสียเซลลูโลส

อ้างอิง	เซลลูโลส	สารเคมีที่ใช้ปรับสภาพ	ระยะเวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	สรุปผลการศึกษา
กนกวรรณ มหารัชมงคล (2558)	ฟางข้าว	NaOH 5% (w/w) H ₂ O ₂ 30% (w/v)	120 60	80 80	-ค่าความเป็นผลึกมีค่าสูงขึ้น -สามารถทำลายโครงสร้างลิกนินและ เฮมิเซลลูโลสได้
Theamdee et al. (2023)	ชานอ้อย	NaOH 20% (w/v) H ₂ O ₂ 25% (v)	-	-	-สามารถทำลายโครงสร้างลิกนินและ เฮมิเซลลูโลสได้
Melesse et al. (2022)	ชานอ้อย	NaOH 4%	45	120	-พันธะเคมี โครงสร้าง และความเป็น ผลึกของวัสดุเซลลูโลสมีการ เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะการกำจัดลิกนิน ซึ่งส่งผล ให้ความเป็นผลึกของวัสดุเซลลูโลส เพิ่มขึ้น
Quoc Ba Thaja et al. (2020)	ชานอ้อย	NaOH 1% (w/v) H ₂ O ₂ 10% (v/v)	120 -	120	-ค่าความเป็นผลึกมีค่าสูงขึ้นแสดงถึง เซลลูโลสมีความบริสุทธิ์ขึ้น -หลังปรับสภาพสามารถขจัด สิ่งเจือปนที่อยู่บนเส้นใยอ้อยได้อย่างมี ประสิทธิภาพ

2.8.2 การใช้เซลล์โลสแอโรเจลในการกำจัดมลพิษโดยวิธีทำแห้งด้วยแรงดันแวดล้อม

จากการทบทวนวรรณกรรม พบว่าการศึกษาการสังเคราะห์แอโรเจลโดยวิธีการทำแห้งด้วยแรงดันแวดล้อมบรรยากาศมีความสำคัญต่อการพัฒนาโครงสร้างของวัสดุให้มีความพรุนสูงและน้ำหนักเบา ซึ่งช่วยเพิ่มคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการใช้งานในด้านต่าง ๆ โดยงานวิจัยของ Ebrahimi et al. (2020) ได้ศึกษาเทคนิคการเตรียมแอโรเจลจากโดยใช้สารเนฟทาลีนและให้สารทำปฏิกิริยากันเป็นเวลา 60 นาที จากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 120 นาที ผลการศึกษา พบว่าแอโรเจลที่มีความหนาแน่นต่ำเพียง 0.058 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีโครงสร้างที่มีความพรุนสูง ซึ่งเป็นลักษณะที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานเป็นวัสดุฉนวนหรือวัสดุกรองอากาศ ในขณะเดียวกันงานวิจัยของ Toivonen et al. (2015) ได้ศึกษาคุณสมบัติของแอโรเจลที่ได้จากนาโนเซลล์โลสโดยเลือกใช้เทคนิคการทำแห้งแบบเยือกแข็งซึ่งช่วยรักษาโครงสร้างแบบนาโนเซลล์โลส อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ พบว่าการใช้แอลกอฮอล์เป็นสารเพิ่มเสถียรภาพของแอโรเจลได้ในระดับหนึ่ง แต่ยังไม่สามารถป้องกันการยุบตัวของโครงสร้างเมื่อเวลาผ่านไปได้ ส่งผลให้แอโรเจลมีค่าความหนาแน่นที่สูงขึ้นอยู่ที่ 0.6 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และค่าความพรุน 206 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งสูงกว่างานวิจัยของ Ebrahimi et al. (2020) นอกจากนี้งานวิจัยของ Zhang et al. (2022) ได้ศึกษาการใช้เซลล์โลสอะซิเตสร่วมกับโพลีเบนซอควาซีนและเอ็น-เมทิลไพโรลิโดน เพื่อสร้างแอโรเจลที่มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นและสามารถใช้เป็นฉนวนกันความร้อนได้ โดยในกระบวนการเตรียมแอโรเจลนั้นได้ใช้การให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3 วัน เพื่อกำจัดตัวทำละลายออก ก่อนนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ซึ่งช่วยเพิ่มความเสถียรของวัสดุ ผลการศึกษา พบว่าแอโรเจลที่มีค่าการนำความร้อนต่ำเพียง 0.033 วัตต์ต่อเมตรเคลวินซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับการใช้เป็นฉนวนความร้อนในอุตสาหกรรมก่อสร้างหรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการลดการสูญเสียพลังงานความร้อน และงานวิจัยของ Wu et al. (2023) ได้ศึกษาแนวทางในการพัฒนาแอโรเจลที่มีคุณสมบัตินำไฟฟ้าโดยใช้นาโนเซลล์โลสร่วมกับ MXene ซึ่งเป็นวัสดุคาร์บอนที่มีสมบัตินำไฟฟ้าสูง แอโรเจลจากงานวิจัยนี้ถูกทำแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศ ทำให้ได้วัสดุที่มีความหนาแน่นเพียง 10 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งต่ำมากและเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการน้ำหนักเบาแต่มีความสามารถในการนำไฟฟ้า

ดังนั้นงานวิจัยทั้งหมดแสดงให้เห็นถึงแนวทางที่หลากหลายในการเตรียมแอโรเจลจากเซลล์โลส การเลือกใช้สารเติมแต่งและกระบวนการทำแห้งมีผลโดยตรงต่อคุณสมบัติของแอโรเจล เช่น ความพรุน ความหนาแน่น การนำความร้อนและความสามารถในการนำไฟฟ้า การพัฒนาแอโรเจลเซลล์โลสให้มีสมบัติที่เหมาะสมต่อการใช้งานเฉพาะด้านจึงเป็นแนวทางสำคัญที่นักวิจัยสามารถนำไปต่อยอดเพื่อสร้างวัสดุที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นในอนาคต ซึ่งสรุปการสังเคราะห์เซลล์โลสแอโรเจลในการกำจัดมลพิษโดยกระบวนการทำแห้งด้วยแรงดันแวดล้อมบรรยากาศซึ่งมีการรวบรวมงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 การสังเคราะห์เซลลูโลสแอโรเจลในการกำจัดมลพิษโดยวิธีทำแห้งด้วยแรงดันแวดล้อม

อ้างอิง	เซลลูโลส	มลพิษ	สถานะในการสังเคราะห์	สรุปผลคุณสมบัติ	สรุปผลการบำบัดมลพิษ
Ebrahimi et al. (2020)	ชานอ้อย	Engine Oil	- บ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 นาที และ 70 °C 120 นาที - อบต่อที่ 120 °C 120 นาที	- ความหนาแน่นต่ำ 0.058 g/cm ³ - ความพรุนสูง (>96.5%) - ค่าการนำความร้อนต่ำ (0.0417 W/m·K)	- ดูดซับได้ 12–18 เท่าของ น้ำหนักตัวเอง - สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ถึง 5 รอบ
Toivonen et al. (2015)	Cellulose Nanofibril	-	- บ่มที่อุณหภูมิห้อง โดยปิดฝาแก้วเพื่อลดแรงดันแคปิลลารี - แอโรเจลถูกปล่อยให้แห้งอย่างช้า ๆ ไม่ได้ระบู่ไว้อย่างชัดเจน	- ความหนาแน่นต่ำ 0.6 g/cm ³ - พื้นที่ผิวจำเพาะ 208 m ² /g	-
Zhang et al. (2022)	Cellulose Acetate	-	- บ่มที่อุณหภูมิ 75°C เป็นเวลา 3 วัน - ทำการบ่มเจลในอ่างน้ำร้อน - อบต่อ 80 °C	- คำนาคำความร้อนที่ 0.033 m ⁻¹ K ⁻¹	-
Wu et al. (2023)	Cellulose Nanofiber	Engine Oil	- บ่มที่อุณหภูมิห้อง - แอโรเจลถูกปล่อยให้แห้งอย่างช้า ๆ ไม่ได้ระบู่ไว้อย่างชัดเจน	- ความหนาแน่นต่ำ 10 mg/cm ³	- น้ำมันจะถูกแอโรเจลดูดซับจนหมดภายใน 2 วินาที - แอโรเจล MXene สามารถดูดซับน้ำมันได้หลายสิบเท่าของ น้ำหนัก

2.8.3 การใช้สังกะสีประจุศูนย์ในการกำจัดมลพิษ

จากการทบทวนวรรณกรรม พบว่าการสังเคราะห์สังกะสีประจุศูนย์เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมสนใจอย่างแพร่หลายในงานด้านเคมีสิ่งแวดล้อมและวัสดุนาโน เนื่องจากมีความสามารถในการรีดักชันสูง และสามารถนำไปใช้ในการบำบัดสารมลพิษต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น สารกำจัดศัตรูพืช โลหะหนัก และสารประกอบอินทรีย์คลอรีน กลไกหลักของสังกะสีประจุศูนย์ในการบำบัดมลพิษเกิดขึ้นจากปฏิกิริยารีดักชัน-ออกซิเดชัน โดยสังกะสีประจุศูนย์ทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนเพื่อลดสารมลพิษให้มีความเป็นพิษน้อยลงหรือเปลี่ยนเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำ ทำให้สามารถกำจัดออกจากระบบน้ำและดินได้ง่ายขึ้น จากงานวิจัยของ Ahmad et al. (2014) ศึกษาการใช้สังกะสีคลอไรด์เป็นสารตั้งต้นและใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์เป็นสารรีดิวซ์ภายใต้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ผลการศึกษา พบว่าสังกะสีประจุศูนย์เป็นอนุภาคสีน้ำตาลดำขนาดใหญ่กว่า 100 ไมโครเมตร และมีคุณสมบัติเป็นกึ่งตัวนำที่มีค่าพลังงานต่ำ นอกจากนี้งานวิจัยของ Taherkhani, S., and Khani, A. (2019) ได้ทดลองใช้ซิงค์คลอไรด์ผสมกับซิงค์ออกไซด์ภายใต้เงื่อนไขการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่าสังกะสีประจุศูนย์ที่เกิดขึ้นมีขนาดอนุภาคเล็กกลึงสีเทาและมีการกระจายตัวสม่ำเสมอมากขึ้น โดยการวิเคราะห์ SEM พบว่าอนุภาคส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 100 นาโนเมตร และการวิเคราะห์ XRD ยืนยันโครงสร้างผลึกของ สังกะสีประจุศูนย์ที่มีขนาดผลึกเฉลี่ย 28 นาโนเมตร ขณะที่งานวิจัยของ Shah et al. (2019) ได้ใช้ซิงค์ไนเตรตเป็นสารตั้งต้นและใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์เป็นตัวรีดิวซ์ภายใต้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ผลการศึกษา พบว่าผลึกสังกะสีประจุศูนย์ที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กกว่าเมื่อเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ โดยการวิเคราะห์ FESEM ซึ่งให้เห็นว่าขนาดอนุภาคสังกะสีประจุศูนย์ส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 50 ถึง 100 นาโนเมตร และมีลักษณะเป็นทรงกลม ซึ่งแตกต่างจากสังกะสีประจุศูนย์ที่สังเคราะห์จาก ซิงค์คลอไรด์ นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ TEM แสดงให้เห็นโครงสร้างของสังกะสีประจุศูนย์ที่มีขนาดผลึกเฉลี่ยอยู่ที่ 3 ถึง 5 นาโนเมตร ซึ่งเล็กกว่าผลึกที่ได้จากการใช้ซิงค์คลอไรด์เป็นสารตั้งต้น และงานวิจัยของ Rahmani et al. (2017) ได้ศึกษาซิงค์คลอไรด์ซึ่งคล้ายกับหลายๆก่อนหน้านี้ แต่จะเน้นการวิเคราะห์ด้วย TEM พบว่าสังกะสีประจุศูนย์ที่ได้มีขนาดผลึกเล็กลงอยู่ที่ประมาณ 25 นาโนเมตร ซึ่งยืนยันถึงความสำคัญของการควบคุมสภาวะการทดลองต่อขนาดและโครงสร้างของวัสดุที่ได้

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยทั้งหมดแสดงให้เห็นว่าแม้ว่าการใช้ซิงค์คลอไรด์หรือซิงค์ไนเตรตเป็นสารตั้งต้นร่วมกับโซเดียมโบโรไฮไดรด์จะสามารถสังเคราะห์สังกะสีประจุศูนย์ได้แต่ลักษณะของผลึกและขนาดของอนุภาคแตกต่างกันขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการทดลอง ซึ่งล้วนมีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสังกะสีประจุศูนย์ที่ได้ ดังนั้นการศึกษากการใช้สังกะสีประจุศูนย์ในการกำจัดมลพิษในงานวิจัยมีสรุปการสังเคราะห์สังกะสีประจุศูนย์ซึ่งได้ทำการรวบรวมงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องแสดงดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 การใช้สังกะสีประจุศูนย์ในการกำจัดมลพิษ

อ้างอิง	สภาวะการสังเคราะห์	มลพิษ	สรุปผลการศึกษา
Ahmad et al. (2014)	สารตั้งต้น : $ZnCl_2$ สารรีดิวซ์ : $NaBH_4$	สารหนู และไนเตรต	<ul style="list-style-type: none"> - Zn^0 เป็นอนุภาคสีน้ำตาลดำ ขนาดผลึกมีขนาดใหญ่กว่า 100 ไมโครเมตร - ผลการดูดซับเหมาะสมกับแบบจำลอง Langmuir - การศึกษาจลนพลศาสตร์สอดคล้องกับแบบจำลองอันดับสองเทียม
Taherkhani et al. (2019)	สารตั้งต้น : $ZnCl_2$ ผสมกับ ZnO สารรีดิวซ์ : $NaBH_4$	กำจัดเมทิลออร์เอนท์ ในน้ำ	<ul style="list-style-type: none"> - Zn^0 เป็นอนุภาคของแข็งสีเทา การวิเคราะห์ SEM พบว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยของ Zn^0 อยู่ที่ประมาณ 100 นาโนเมตร การวิเคราะห์ XRD พบว่าขนาดผลึกของ Zn^0 คือ 28 นาโนเมตร - การย่อยสลายเป็นไปตามแบบจำลองจลนศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม - ผง ZnO และ Zn^0 มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดเมทิลออร์เอนท์ในน้ำ
Shah et al. (2019)	สารตั้งต้น : $Zn(NO_3)_2$ สารรีดิวซ์ : $NaBH_4$	กำจัดคลอรีไฟรฟอส ในน้ำ (CPY)	<ul style="list-style-type: none"> - Zn^0 เป็นอนุภาคของแข็งสีเทา การวิเคราะห์ FESEM ของ Zn^0 แสดงโครงสร้างนาโนแบบหลายชั้นหรือคล้ายแผ่น ซึ่งกว้าง 50–100 นาโนเมตร และหนา 3–5 นาโนเมตร การวิเคราะห์ TEM พบจุดมืดบางจุดที่อาจเกิดจากการรวมตัวของอนุภาค Zn^0 - nZVZn สามารถกำจัด CPY ได้ 55% ภายในเวลา 90 นาที - เมื่อเติม PMS ประสิทธิภาพการกำจัด CPY เพิ่มขึ้นเป็น 99.5%
Rahmani et al. (2017)	สารตั้งต้น : $ZnCl_2$ สารรีดิวซ์ : $NaBH_4$	กำจัดยาไซโปรฟลอกซาซิน (Ciprofloxacin)	<ul style="list-style-type: none"> - Zn^0 เป็นตะกอนสีขาว การวิเคราะห์ TEM พบว่ามีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 25 นาโนเมตร - สามารถกำจัดยาไซโปรฟลอกซาซินได้ 55% ภายใต้เงื่อนไข คือ pH 4.5 KPS = 1200 มก./ลิตร และปริมาณ NZVZ = 120 มก./ลิตร

2.8.4 การใช้สารเปอร์ซัลเฟตในการกำจัดมลพิษ

จากการทบทวนวรรณกรรมสารเปอร์ซัลเฟต พบว่าการใช้สารเปอร์ซัลเฟตในการกำจัดมลพิษสามารถทำได้ในหลายรูปแบบ เช่น การใช้งานร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น สังกะสี หรือเหล็ก เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานในสภาวะที่มีอุณหภูมิและความดันที่เหมาะสม นอกจากนี้ยังมีการศึกษาถึงการนำสารเปอร์ซัลเฟตในรูปแบบของการกระตุ้น (activation) เพื่อให้เกิดการสลายตัวของสารพิษ ซึ่งทำให้เกิดสารที่ไม่เป็นพิษหรือสามารถย่อยสลายได้ง่ายขึ้นในสิ่งแวดล้อม ซึ่งจากงานวิจัยของ Guo et al. (2017) ศึกษาการใช้สังกะสีประจุศูนย์ร่วมกับเปอร์ซัลเฟตสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารมลพิษประเภทไนโตรเบนซีน โดยการใช้ สังกะสีประจุศูนย์และเปอร์ซัลเฟตด้วยพร้อมกัน สามารถลดปริมาณไนโตรเบนซีนได้ถึงร้อยละ 96 ภายในเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งสูงกว่าการใช้สังกะสีประจุศูนย์หรือเปอร์ซัลเฟตเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้การใช้คลื่นอัลตราซาวด์ร่วมด้วยยิ่งช่วยเสริมกระบวนการกำจัดสารไนโตรเบนซีนได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากคลื่นอัลตราซาวด์สามารถช่วยลดการเกิดชั้นออกไซด์ที่ผิวของสังกะสีประจุศูนย์ซึ่งเป็นตัวขัดขวางการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าสังกะสีประจุศูนย์และเปอร์ซัลเฟตสามารถทำงานร่วมกันได้ดีภายใต้สภาวะที่เหมาะสม และสามารถนำไปใช้ประยุกต์ในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสารอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้งานวิจัยของ Hao et al. (2020) ได้ศึกษาการใช้สังกะสีประจุศูนย์และเปอร์ซัลเฟตในการกำจัดสารซีโพรฟลอกซาซินซึ่งเป็นสารปฏิชีวนะที่พบได้ในแหล่งน้ำเสียจากอุตสาหกรรมยา โดยพบว่าการเพิ่มค่าความเป็นกรดต่างช่วยกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ระหว่างสังกะสีประจุศูนย์และเปอร์ซัลเฟต ทำให้สามารถกำจัดซีโพรฟลอกซาซินได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงขึ้น อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของกระบวนการนี้จะลดลงเมื่อความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตสูง เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของเปอร์ซัลเฟตซึ่งอาจลดอัตราการเกิดอนุมูลอิสระซัลเฟตที่มีบทบาทสำคัญในการทำลายโครงสร้างของซีโพรฟลอกซาซิน ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการควบคุมปริมาณเปอร์ซัลเฟตที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดสารปนเปื้อน และงานวิจัยของ Li et al. (2014) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของสังกะสีประจุศูนย์และเปอร์ซัลเฟตในการกำจัดเมทิลออเรนที่ซึ่งเป็นสีย้อมสังเคราะห์ที่พบได้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้สังกะสีประจุศูนย์ร่วมกับเปอร์ซัลเฟตสามารถกำจัดเมทิลออเรนที่ไ้มากกว่าร้อยละ 90 ภายในเวลาอันสั้น และยังมีประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้เปอร์ซัลเฟตเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ผลการทดลองยังชี้ให้เห็นว่าอัตราการกำจัดเมทิลออเรนที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสังกะสีประจุศูนย์ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ช่วยเร่งการแตกตัวของเปอร์ซัลเฟตให้กลายเป็นอนุมูลซัลเฟตที่มีพลังงานสูง

ดังนั้นการศึกษาทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่าการใช้สังกะสีประจุศูนย์ควบคู่กับเปอร์ซัลเฟตเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารมลพิษอินทรีย์ที่พบได้ในแหล่งน้ำเสียอุตสาหกรรม โดยปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการนี้ ได้แก่ ค่าความเป็นกรดต่าง ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตและการใช้เทคนิคเสริม เช่น คลื่นอัลตราซาวด์ ซึ่งช่วยเพิ่มอัตราการเกิดอนุมูลซัลเฟตที่เป็นตัวออกไซด์ที่มีศักยภาพสูง แนวทางการใช้สังกะสีประจุศูนย์และเปอร์ซัลเฟตจึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่มีศักยภาพในการบำบัดมลพิษทางน้ำและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมที่มีการปล่อยน้ำเสียปนเปื้อนสารอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งการศึกษานี้การใช้สารเปอร์ซัลเฟตในการกำจัดมลพิษซึ่งได้ทำการรวบรวมงานวิจัยต่าง ๆ มีการสรุปแสดงดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 การใช้สารเปอร์ซัลเฟตในการกำจัดมลพิษ

อ้างอิง	ตัวเร่งปฏิกิริยา	มลพิษ	สรุปผลการศึกษา
Guo et al. (2017)	Zero-valent zinc activated persulfate	Nitrobenzene (NB)	<ul style="list-style-type: none"> - เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัด Nitrobenzene (NB) ในระบบต่าง ๆ ได้แก่ การใช้ Ultrasound (US) เพียงอย่างเดียว การใช้ Zero-Valent Zinc (Zn^0) + US การใช้ Persulfate (PS) + US การใช้ Zn^0 + PS + US และการใช้ Zn^0 + PS (ไม่มี US) - ผลการกำจัด NB (%) ภายใน 2 ชั่วโมง ด้วย (US) พบว่าไม่มีประสิทธิภาพร้อยละ 0 การใช้ PS + US พบว่ามีประสิทธิภาพร้อยละ 5 การใช้ (Zn^0) + US พบว่ามีประสิทธิภาพร้อยละ 21 การใช้ Zn^0 + PS (ไม่มี US) พบว่ามีประสิทธิภาพร้อยละ 48 และการใช้ Zn^0 + PS + US พบว่ามีประสิทธิภาพร้อยละ 96 - การใช้ Zn^0 + PS + US ซึ่ง Zn^0 ช่วยกระตุ้น PS ให้เกิดอนุมูลซัลเฟตและอนุมูลไฮดรอกซิลซึ่งช่วยเพิ่มอัตราการย่อยสลาย NB แสดงดังสมการต่อไปนี้ $Zn^0 + S_2O_8^{2-} \longrightarrow Zn^{2+} + 2SO_4^{\bullet -}$ - US ช่วยเพิ่มการกระจายตัวของ Zn^0 และขจัดชั้น passivating coating บนพื้นผิว Zn^0 ทำให้ PS ทำปฏิกิริยากับ Zn^0 ได้ดีขึ้น
Hao et al. (2020)	Zero-valent zinc activated persulfate	Ciprofloxacin (CIP)	<ul style="list-style-type: none"> - เมื่อค่า pH สูงขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดลดลง เนื่องจากการตกตะกอนของไฮดรอกไซด์ ทำให้ลดการเกิดอนุมูลอิสระ - ประสิทธิภาพการกำจัด CIP เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ PS จนถึง 2.25 mM แต่เมื่อเกินจากค่านี้อัตราประสิทธิภาพลดลงเนื่องจากการทำลายตัวเองของอนุมูลอิสระซัลเฟต - อนุมูลอิสระซัลเฟตและอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลเป็นอนุมูลหลักในการกำจัด CIP โดยอนุมูลซัลเฟตมีบทบาทสำคัญมากที่สุด
Li et al. (2014)	Zero-valent zinc activated persulfate	Methyl orange (MO)	<ul style="list-style-type: none"> - เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัด (MO) ในระบบต่าง ๆ ได้แก่ การใช้ PS เพียงอย่างเดียว การใช้ Zn^0 เพียงอย่างเดียว และการใช้ Zn^0 + PS - การใช้ PS เพียงอย่างเดียวสามารถกำจัด MO ได้เพียง 28% ภายใน 3 ชั่วโมง การใช้ Zn^0 เพียงอย่างเดียวสามารถลดปริมาณ MO ได้ 51% และการใช้ Zn^0 + PS สามารถกำจัด MO ได้มากถึง 90%

ตารางที่ 2.9 การใช้สารเปอร์ซัลเฟตในการกำจัดมลพิษ (ต่อ)

อ้างอิง	ตัวเร่งปฏิกิริยา	มลพิษ	สรุปผลการศึกษา
			<ul style="list-style-type: none"> - กลไกการทำงานของ Zn^0 ช่วยกระตุ้น PS ให้สร้างอนุมูลอิสระซัลเฟต ซึ่งเป็นอนุมูลอิสระที่มีศักย์ออกซิเดชันสูงกว่า PS และยังสามารถเปลี่ยนเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลที่สามารถออกซิไดซ์ MO ได้ แสดงดังสมการต่อไปนี้ $Zn^0 + S_2O_8^{2-} \longrightarrow Zn^{2+} + 2SO_4^{\bullet-}$
Liang et al. (2009)	Thermally activated persulfate (TAP)	chloramphenicol (CAP)	<ul style="list-style-type: none"> - ค่าคงที่อัตราปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิสูงกว่า 40°C เป็นเงื่อนไขของปฏิกิริยา TAP - ปริมาณ PS ที่สูงขึ้นทำให้ CAP ถูกกำจัดเร็วขึ้น โดยค่า k_{obs} เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ SPS - ค่า pH 2.96 เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการกำจัด CAP - pH เป็นกรด (<5) : อนุมูลอิสระซัลเฟตเป็นตัวออกซิไดซ์หลัก และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของ TAP - pH เป็นด่าง (>7) : อนุมูลอิสระไฮดรอกซิลเริ่มมีบทบาทมากขึ้น แต่ประสิทธิภาพโดยรวมลดลงเนื่องจากไอออนไบคาร์บอเนต สามารถยับยั้งการเกิดอนุมูลอิสระซัลเฟตได้
Acero et al. (2018)	UV-activated persulfate	Emerging Contaminants, (ECs) 5 ชนิด คือ Benzotriazole (BZ) DEET (DT) Chlorophene (CP) Methylindole (ML) Nortriptyline hydrochloride (NH)	<ul style="list-style-type: none"> - เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารปนเปื้อนโดยใช้ UV/PS และใช้ PS อย่างเดียว (ไม่มี UV) - เงื่อนไขการทดลอง : $[PS]_0 = 50 \mu M$, $[EC]_0 = 1 \mu M$, $T = 20^\circ C$, pH 7 - PS อย่างเดียว (ไม่มี UV) : ไม่สามารถกำจัด ECs ได้ดี มีเพียง NH และ ML ที่ถูกกำจัดมากกว่าร้อยละ 10 ภายใน 30 นาที - UV/PS : มีประสิทธิภาพดีที่สุด ในการกำจัด ECs เนื่องจากมีอนุมูลอิสระซัลเฟตและอนุมูลไฮดรอกซิล แสดงดังสมการต่อไปนี้ $S_2O_8^{2-} \xrightarrow{\Delta/h\nu} 2SO_4^{\bullet-}$

2.8.5 การบำบัดสารเมโรมิลด้วยกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงเป็นเทคนิคสำคัญที่ถูกนำมาใช้ในการกำจัดสารเมโรมิลจากน้ำเสีย โดยกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงอาศัยการสร้างอนุมูลอิสระที่มีศักยภาพสูง เช่น อนุมูลอิสระไฮดรอกซิล และอนุมูลอิสระซัลเฟต ซึ่งสามารถทำลายโครงสร้างของเมโรมิลผ่านกระบวนการออกซิเดชัน กระบวนการเหล่านี้สามารถดำเนินการได้โดยใช้เทคนิคต่าง ๆ เช่น การใช้สารเปอร์ซัลเฟตที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต ความร้อน หรือไอออนโลหะ เช่น ไอออนเหล็กซึ่งช่วยเร่งการสลายตัวของสารเมโรมิลให้เร็วขึ้น อีกทั้งเทคโนโลยีโฟโตคะตาไลซิสที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ภายใต้การฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งจากงานวิจัยของ Hayat et al. (2021) ศึกษาการย่อยสลายของสารกำจัดศัตรูพืชเมโรมิลในน้ำโดยใช้กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงที่อาศัยเพอร์ออกซีโมนิซัลเฟตเป็นตัวออกซิไดซ์ เปรียบเทียบสามระบบ ได้แก่ เพอร์ออกซีโมนิซัลเฟตอย่างเดียว ไฟไรท์-เพอร์ออกซีโมนิซัลเฟต และเหล็กประจุศูนย์ร่วมกับเพอร์ออกซีโมนิซัลเฟต จากการศึกษา พบว่า ไฟไรท์-เพอร์ออกซีโมนิซัลเฟตมีประสิทธิภาพสูงสุดร้อยละ 94.9 รองลงมาคือไฟไรท์-เพอร์ออกซีโมนิซัลเฟตร้อยละ 87.0 และเพอร์ออกซีโมนิซัลเฟตอย่างเดียวร้อยละ 85.4 การวิเคราะห์ด้วย Electron Paramagnetic Resonance (EPR) และการทดสอบ Free Radical Quenching Test เพื่อตรวจสอบชนิดของอนุมูลอิสระหรือตัวออกซิไดซ์หลักในการย่อยสลายสารเมโรมิลซึ่งชี้ให้เห็นว่ากระบวนการนี้เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบไม่ใช่อนุมูลอิสระ (Non-Radical Oxidation) เพอร์ออกซีโมนิซัลเฟตอย่างเดียวยังคงมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารเมโรมิลในน้ำจริงโดยมีประสิทธิภาพการกำจัดที่ร้อยละ 66.5 ในน้ำก๊อก ร้อยละ 63.7 ในน้ำทะเลสาบและร้อยละ 60.4 ในน้ำเสีย ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของเพอร์ออกซีโมนิซัลเฟตอย่างเดียวก่อนการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนสารเมโรมิลอย่างมีประสิทธิภาพ และงานวิจัยของ Hayat et al. (2023) ศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบไฟไรท์-เพอร์ออกซีไดซัลเฟตและเหล็กประจุศูนย์ร่วมกับเพอร์ออกซีไดซัลเฟต ในการกระตุ้นเพอร์ออกซีไดซัลเฟตเพื่อย่อยสลายสารกำจัดศัตรูพืชเมโรมิลในน้ำ เนื่องจากสารเมโรมิลเป็นสารกำจัดศัตรูพืชที่มีความสามารถในการละลายน้ำสูงและสามารถปนเปื้อนในแหล่งน้ำได้ง่าย กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงที่ใช้เพอร์ออกซีไดซัลเฟตเป็นเทคนิคที่มีศักยภาพในการบำบัดมลพิษทางน้ำ โดยงานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการย่อยสลายสารเมโรมิล เช่น ปริมาณตัวกระตุ้น ความเข้มข้นของสารปนเปื้อน ความเข้มข้นของสารออกซิไดซ์ ค่าความเป็นกรดต่าง และอุณหภูมิ จากการทดลองพบว่าไฟไรท์-เพอร์ออกซีไดซัลเฟตและเหล็กประจุศูนย์ร่วมกับเพอร์ออกซีไดซัลเฟตสามารถย่อยสลายสารเมโรมิลได้ร้อยละ 98.8 และร้อยละ 97.5 ตามลำดับ ภายในเวลา 20 นาที และพบว่าประสิทธิภาพการย่อยสลายเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณตัวกระตุ้นและสารออกซิไดซ์ การวิเคราะห์โดยใช้การกักกันอนุมูลอิสระแสดงให้เห็นว่า กลไกการย่อยสลายของทั้งสองระบบแตกต่างกัน โดยไฟไรท์-เพอร์ออกซีไดซัลเฟตอาศัยอนุมูลซัลเฟตและไฮดรอกซิลเป็นหลัก ในขณะที่เหล็กประจุศูนย์ร่วมกับเพอร์ออกซีไดซัลเฟตอาศัยอนุมูลซัลเฟตและอนุมูลซูเปอร์ออกไซด์ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารเมโรมิล นอกจากนี้ยังพบว่าเหล็กประจุศูนย์ร่วมกับเพอร์ออกซีไดซัลเฟตมีเสถียรภาพที่ดีกว่าเมื่อใช้ซ้ำและยังคงมีประสิทธิภาพสูงแม้ในสภาวะน้ำจริงที่มีสารปนเปื้อนต่าง ๆ เช่น น้ำก๊อกและน้ำเสีย ในขณะที่ไฟไรท์-เพอร์ออกซีไดซัลเฟตมีแนวโน้ม

ที่จะสูญเสียประสิทธิภาพเมื่อใช้ซ้ำ ซึ่งอาจเกิดจากการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาและการก่อตัวของตะกอนเหล็ก ซึ่งเหล็กประจุศูนย์ร่วมกับเปอร์ออกไซด์ซัลเฟตแสดงให้เห็นถึงศักยภาพที่สูงกว่าในการบำบัดสารเมธิลีนในน้ำ เนื่องจากมีความเสถียรสูงกว่าและสามารถนำไปใช้ในสภาพแวดล้อมที่ซับซ้อนได้ดี ในขณะที่ไฟโรต์-เปอร์ออกไซด์ซัลเฟตแม้ว่าจะมีประสิทธิภาพสูงในการทดลองระยะสั้น แต่มีข้อจำกัดในด้านความคงทนและการนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งเหล็กประจุศูนย์ร่วมกับเปอร์ออกไซด์ซัลเฟตเป็นทางเลือกที่เหมาะสมมากกว่าในการบำบัดสารกำจัดศัตรูพืชในแหล่งน้ำที่ปนเปื้อน ซึ่งการศึกษาการบำบัดสารเมธิลีนด้วยกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงซึ่งได้ทำการสรุปงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องดังตารางที่ 2.10



ตารางที่ 2.10 การบำบัดสารเมไธมิลด้วยกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง

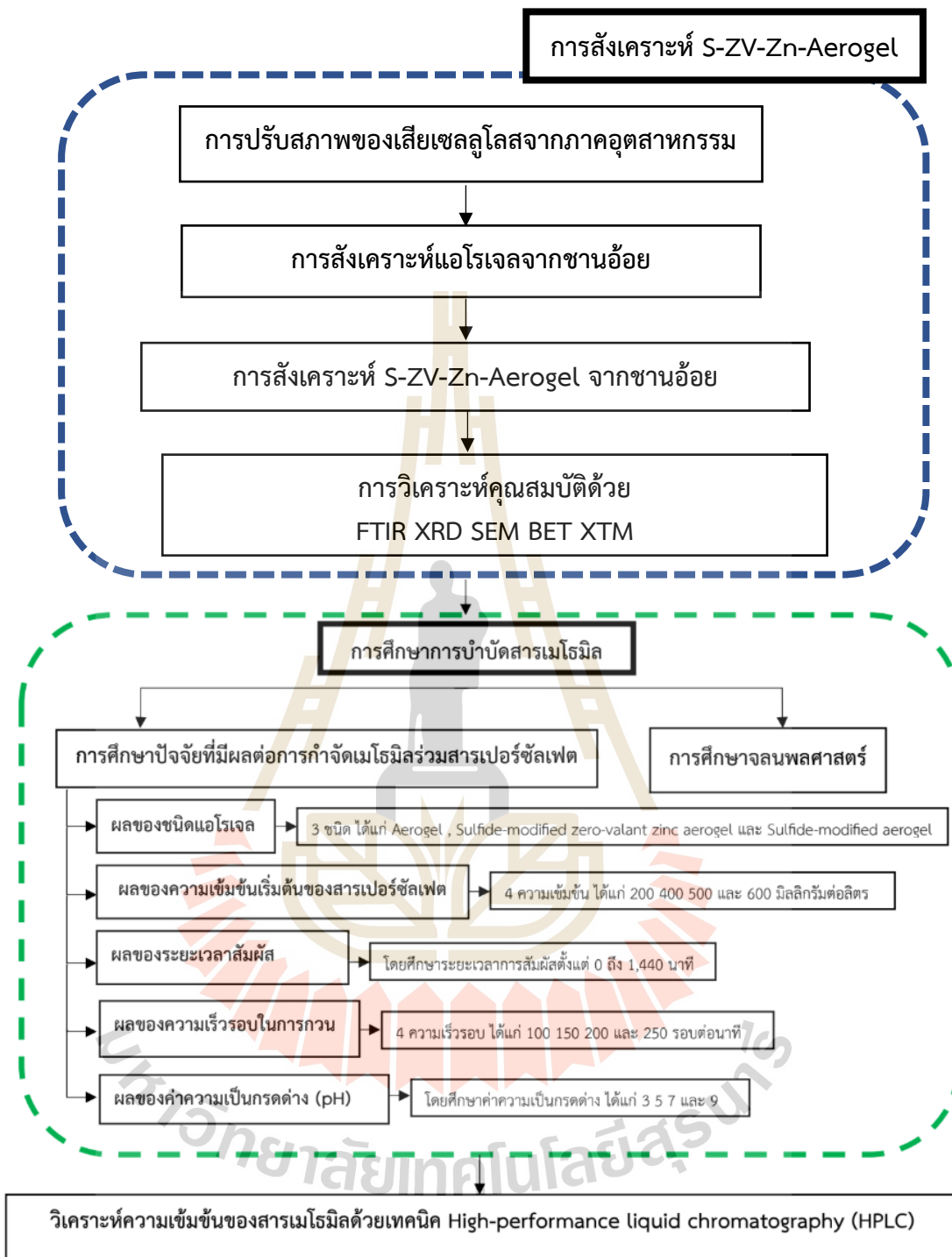
อ้างอิง	กำจัด Methomyl ด้วยกระบวนการ	สารเคมีที่ใช้	สรุปผลการศึกษา
Hayat et al. (2021)	Advanced Oxidation Processes	Peroxymonosulfate (PMS)	<ul style="list-style-type: none"> - ทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารเมไธมิล ซึ่งศึกษา 3 การทดลอง ได้แก่ PMS-Only, Pyrite (PyR)-PMS และ Zero-Valent Iron (ZVI)-PMS - เงื่อนไขการทดลอง คือ MET =20.0 mg/L, PMS =1.0 mmol/L, activator dosage =0.25 g/L, initial pH =7.0 - ผลการศึกษา พบว่า ระบบ PyR-PMS มีประสิทธิภาพสูงสุด (ร้อยละ 94.9) รองลงมาคือ ZVI-PMS (ร้อยละ 87.0) และ PMS-Only (ร้อยละ 85.4)
Hayat et al. (2023)	Advanced Oxidation Processes	Zero-valent iron activated peroxydisulfate (PDS)	<ul style="list-style-type: none"> - ทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารเมไธมิล ซึ่งศึกษา 3 การทดลอง ได้แก่ PyR/Only, ZVI/Only และ PDS/Only แต่ประสิทธิภาพสามารถกำจัดสารเมไธมิล อยู่ในช่วงร้อยละ 2.3–5.2 - จึงมีการเพิ่มสาร (PDS) เข้าในการทดลอง พบว่า PyR-PDS และ ZVI-PDS สามารถย่อยสลาย MET ได้ร้อยละ 98.8 และร้อยละ 97.5 ตามลำดับ ภายในเวลา 20 นาที - ซึ่งมีเงื่อนไขการทดลอง คือ MET = 20.0 มิลลิกรัมต่อลิตร PDS =1.0 มิลลิโมลต่อลิตร activators' dosage =0.25 กรัมต่อลิตร pH =7 reaction time =60 นาที - ดังนั้น เมื่อเปรียบเทียบกันแล้ว การกำจัด MET โดยระบบ PDS/Only ย่อยสลายโดยอนุมูลซัลเฟตและไฮดรอกซิล ซึ่งประสิทธิภาพการย่อยสลายเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณตัวกระตุ้นและสารออกซิไดซ์

บทที่ 3

การศึกษาดำเนินงาน

งานวิจัยนี้เป็นการใช้ประโยชน์ของเสียเซลลูโลสจากภาคอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาล โดยการนำชานอ้อยที่เป็นของเสียจากอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาลมาทำการสังเคราะห์เป็นวัสดุดูดซับแอมโมเนีย และมีการเพิ่มประสิทธิภาพวัสดุดูดซับแอมโมเนียด้วยสังกะสีประจุศูนย์ซัลไฟด์ร่วมกับสารเปอร์ซัลเฟต ซึ่งการทดลองในส่วนแรกเป็นการสังเคราะห์วัสดุดูดซับแอมโมเนียและสังเคราะห์วัสดุดูดซับแอมโมเนียที่ผสมสังกะสีประจุศูนย์ซัลไฟด์โดยมีการนำไปวิเคราะห์คุณลักษณะสมบัติด้วยเทคนิคต่าง ๆ ได้แก่ เทคนิควิเคราะห์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) เทคนิควิเคราะห์ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier-transform infrared spectroscopy, FTIR) เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer, XRD) เทคนิควิเคราะห์พื้นที่ผิวและหาความพรุนของอนุภาค (Surface Area And Porosity Analyzer, BET) และเทคนิควิเคราะห์ถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์สามมิติระดับจุลภาคด้วยเอกซเรย์ย่านพลังงานสูงจากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอน (X-ray Tomographic Microscopy, XTM) โดยนำวัสดุดูดซับแอมโมเนียและวัสดุดูดซับแอมโมเนียที่ผสมสังกะสีประจุศูนย์ซัลไฟด์เพื่อเป็นวัสดุดูดซับสำหรับกำจัดสารเมธิล ซึ่งในการทดลองส่วนที่สองเป็นการกำจัดสารเมธิลร่วมกับสารเปอร์ซัลเฟต โดยมีปัจจัยในการศึกษาดังนี้ ชนิดของแอมโมเนีย ความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟต ระยะเวลาสัมผัส ความเร็วรอบในการกวน และค่าความเป็นกรดต่าง ซึ่งความเข้มข้นของสารเมธิลที่ได้รับการตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (High-performance liquid chromatography, HPLC) แล้วนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการดูดซับสารเมธิลกับเวลา โดยมีรูปแบบและขั้นตอนการวิจัยและแผนการวิจัย ดังนี้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

3.1 สารเคมี เครื่องมือ และอุปกรณ์

3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

สารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์แโรเจลผสมสังกะสีประจุศูนย์ซัลไฟด์ ซึ่งรวมถึง ขั้นตอนการปรับสภาพของเสียจากภาคอุตสาหกรรมด้วย การเตรียมสารละลายเมธอซิล การเตรียม สารเปอร์ซัลเฟต และสารเคมีที่ใช้ในการตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะ สูง (HPLC) ได้แก่ ของเสียขานอ้อยจากอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาล โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เนฟทาลีน (Naphthalene) เอทานอล (Ethanol) อะซิโตน (Acetone) โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ($NaBH_4$) โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ ($Na_2S_2O_4$) สารเมธอซิล (Methomyl) สารโซเดียมเปอร์ซัลเฟต ($Na_2S_2O_8$) อะซิโตนไนไตรท์ (Acetonitrile) เมทานอล (Methanol) และน้ำปราศจากไอออน (DI Water)

3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือหลักที่ใช้ในการศึกษางานวิจัย ได้แก่ เครื่องวัดค่าความเป็นกรดต่าง (pH Meter) เครื่องบดละเอียด (Grinder) โกรกบดสารเคมี (Mortar And Pestle) ตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven) ตู้ดูดไอสารเคมี (Laboratory Chemical Fume Hood) เตาให้ความร้อน (Hotplate) เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Analytical Balance 4 digits) เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและหาความพรุน ของอนุภาค (BET) เครื่องวิเคราะห์ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FTIR) เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) เครื่องวิเคราะห์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เครื่องวิเคราะห์ถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์สามมิติระดับจุลภาคด้วยเอกซเรย์ย่านพลังงาน สูงจากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอน (XTM) เครื่องวิเคราะห์โครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (HPLC) และอุปกรณ์เครื่องแก้วต่าง ๆ

3.2 การสังเคราะห์แโรเจลจากขานอ้อย

3.2.1 การปรับสภาพของเสียเซลลูโลสจากขานอ้อย

การปรับสภาพของเสียเซลลูโลสจากภาคอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นวัตถุดิบของเสีย ขานอ้อยที่ได้จากระบวนการหีบอ้อยในภาคอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาล ซึ่งสามารถทำได้จากการนำ ขานอ้อยมาล้างทำความสะอาดที่มีการปนเปื้อนจากภายนอกและนำมาบดให้ขานอ้อยเป็นเส้นใย จากนั้นนำไปอบแห้งแล้วนำเส้นใยขานอ้อยแห้งที่มีสัดส่วนร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก นำไปปรับสภาพ ทางเคมีด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้นของสารร้อยละ 5 (น้ำหนักต่อน้ำหนัก) โดยต้มย่อยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำ ปราศจากไอออน ให้อยู่ในสภาวะความเป็นกรดต่างเป็นกลาง ต่อมานำเส้นใยขานอ้อยดังกล่าวไปปรับ สภาพต่อด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ความเข้มข้นของสารร้อยละ 30 (น้ำหนัก ต่อปริมาตร) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ต่อมานำไปปรับสภาพต่อด้วยสารละลาย กรดซัลฟิวริก ที่ความเข้มข้นของสารร้อยละ 64 จากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน ให้อยู่ใน สภาวะความเป็นกรดต่างเป็นกลาง ต่อมานำขานอ้อยที่ปรับสภาพตามขั้นตอนดังกล่าวไปอบแห้ง

เพื่อให้ได้ความชื้นที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นเมื่อครบเวลาก็จะได้ชานอ้อยที่ปรับสภาพแล้ว

การปรับสภาพของเสี่ยเซลลูโลสชานอ้อยจากอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาล ซึ่งเลือกใช้ในศึกษาจากผลการศึกษาของ กนกวรรณ มหารัชฆมงคล (2558) ซึ่งการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในการปรับสภาพเส้นใยมีการกระจายตัวได้ดีซึ่งส่งผลต่อการถูกกำจัดของเอมิเซลลูโลสซึ่งทำหน้าที่ผสมเส้นใยเข้าด้วยกันและสามารถกำจัดสิ่งสกปรกที่เจือปน อื่น ๆ ได้ดีที่ไม่ใช่เซลลูโลส ส่วนการปรับสภาพด้วยสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่าเส้นใยมีลักษณะรวมตัวกันเป็นแผ่นซึ่งเป็นผลจากเอมิเซลลูโลส ซึ่งจะสามารถเห็นการกระจายตัวของเส้นใยได้อย่างชัดเจน ซึ่งมีรายละเอียดขั้นตอนการปรับสภาพของเสี่ยภาคอุตสาหกรรมดังแสดงในรูปที่ 3.2 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการปรับสภาพของเสี่ยภาคอุตสาหกรรม

3.2.2 การสังเคราะห์แอร์เจลจากเซลลูโลสขานอ้อย

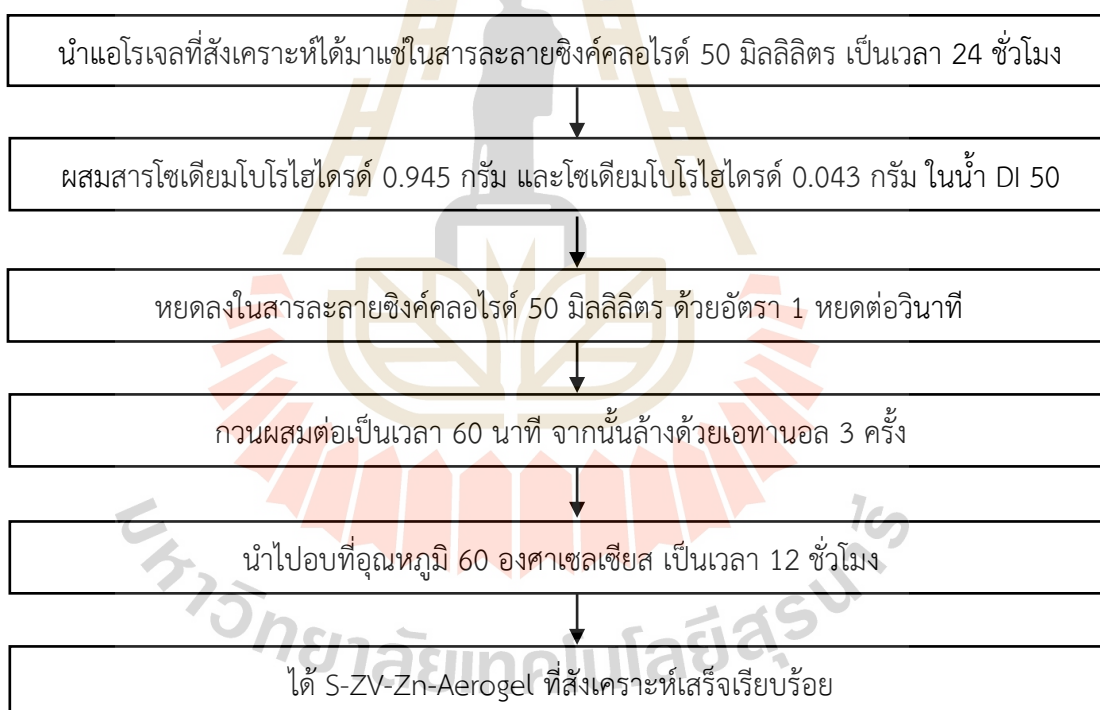
การสังเคราะห์แอร์เจลจากเซลลูโลสขานอ้อย สามารถทำได้จากเตรียมสารละลายเนฟทาไลน์ ซึ่งละลายสารด้วยเอทานอลและอะซิโตนกวนผสมและให้ความร้อนที่ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที ซึ่งภาชนะที่บรรจุสารละลายจะต้องปิดให้มิดชิด เพื่อป้องกันการระเหยของสารละลายโดยต่อมาเติมเซลลูโลสขานอ้อยที่มีการปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมีแล้วลงไป ในสารละลายเนฟทาไลน์ที่ทำการเตรียมไว้ก่อนข้างต้น จากนั้นทำการเติมสารละลายโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ ลงไปแล้วกวนผสมต่อเป็นเวลา 60 นาที จนกว่าทำให้สารละลายทุกอย่างผสมเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นเทสารละลายทั้งหมดลงในแม่พิมพ์ซิลิโคน แล้วตั้งแม่พิมพ์ซิลิโคนไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 120 นาที และนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อระเหยสารเอทานอลและอะซิโตน และไล่ความชื้นออก ต่อมนำไปอบต่อที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อระเหยสารเนฟทา เมื่อครบเวลาจะได้แอร์เจลจากของเสียเซลลูโลสจากภาคอุตสาหกรรม (Ebrahimi et al., 2020) มีรายละเอียดขั้นตอนการสังเคราะห์แอร์เจลจากของเสียเซลลูโลสจากภาคอุตสาหกรรมดังแสดงในรูปที่ 3.3 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการสังเคราะห์แอร์เจลจากของเสียเซลลูโลสขานอ้อย

3.2.3 การสังเคราะห์แอโรเจลที่ผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ (S-ZV-Zn-Aerogel)

การสังเคราะห์แอโรเจลที่ผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ สามารถทำได้จากการนำแอโรเจลจากของเสียเซลล์โลสซานอ้อยที่สังเคราะห์ได้จากหัวข้อที่ 3.2.2 โดยนำแอโรเจลมาแช่ในสารละลายซิงค์คลอไรด์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ภาชนะที่บรรจุสารละลายจะต้องปิดให้มิดชิดโดยแช่ทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ต่อมาทำเตรียมสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.945 กรัม ผสมกับสารละลายโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ 0.043 กรัม โดยละลายกับน้ำปราศจากไอออน ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ออกซิเจนด้วยแก๊สไนโตรเจน และกวนผสมเป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นทำการหยุดสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์และโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ ที่เตรียมไว้หยดลงในสารละลายซิงค์คลอไรด์ที่มีแอโรเจลแช่อยู่ ซึ่งหยดด้วยอัตราการใช้ 1 หยดต่อวินาที จากนั้นกวนผสมต่อเป็นเวลา 60 นาที เมื่อครบเวลาแล้วนำแอโรเจลมาล้างด้วยเอทานอล จำนวน 3 ครั้ง จากนั้นนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาจะได้ S-ZV-Zn-Aerogel ที่สังเคราะห์เสร็จเรียบร้อย (Khani et al., 2019) มีรายละเอียดขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 3.4 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.4 การสังเคราะห์แอโรเจลที่ผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์

3.2.4 การสังเคราะห์แอโรเจลที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ (Sulfide-modified aerogel)

การสังเคราะห์แอโรเจลที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ สามารถทำได้จากการนำแอโรเจลจากของเสียเซลล์ulosซานอ้อยที่สังเคราะห์ได้จากหัวข้อที่ 3.2.2 โดยนำแอโรเจลมาแช่ในสารละลายโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ภาชนะที่บรรจุสารละลายจะต้องปิดให้มิดชิดโดยแช่ทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาจะได้ Sulfide-modified aerogel ที่สังเคราะห์เสร็จเรียบร้อย มีรายละเอียดขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 3.5 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.5 การสังเคราะห์แอโรเจลที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์

3.2.4 การวิเคราะห์คุณลักษณะสมบัติด้วยเครื่องมือต่าง ๆ

การวิเคราะห์คุณลักษณะสมบัติของแอโรเจลที่ผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์จากเซลล์ulosซานอ้อย ซึ่งจะทำการศึกษาคคุณลักษณะสมบัติของแอโรเจลและแอโรเจลผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ ประกอบด้วย การวิเคราะห์ด้วย SEM เป็นเทคนิคที่แสดงสัณฐานวิทยาและโครงสร้างของแอโรเจล การวิเคราะห์ด้วย FTIR เป็นการศึกษาลักษณะหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบอินทรีย์ซึ่งมีการศึกษาลักษณะของเซลล์ulosซานอ้อยและองค์ประกอบอื่นๆ การวิเคราะห์ด้วย XRD เป็นเทคนิคการศึกษาโครงสร้างผลึกของเซลล์ulosซานอ้อย การวิเคราะห์ด้วย BET เป็นการศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะของแอโรเจล และการวิเคราะห์ด้วย XTM เป็นเทคนิคที่ให้ผลวิเคราะห์ในรูปแบบภาพตัดขวางของตัวอย่างที่บ่งแสงได้โดยไม่ทำลายตัวอย่าง สามารถนำไปวิเคราะห์คุณลักษณะและโครงสร้าง เช่น ความพรุน ตำหนิรอยร้าว หรือการกระจายขององค์ประกอบภายในของตัวอย่างได้แบบสามมิติ ซึ่งแสดงดังตารางที่ 3.1 ดังต่อไปนี้

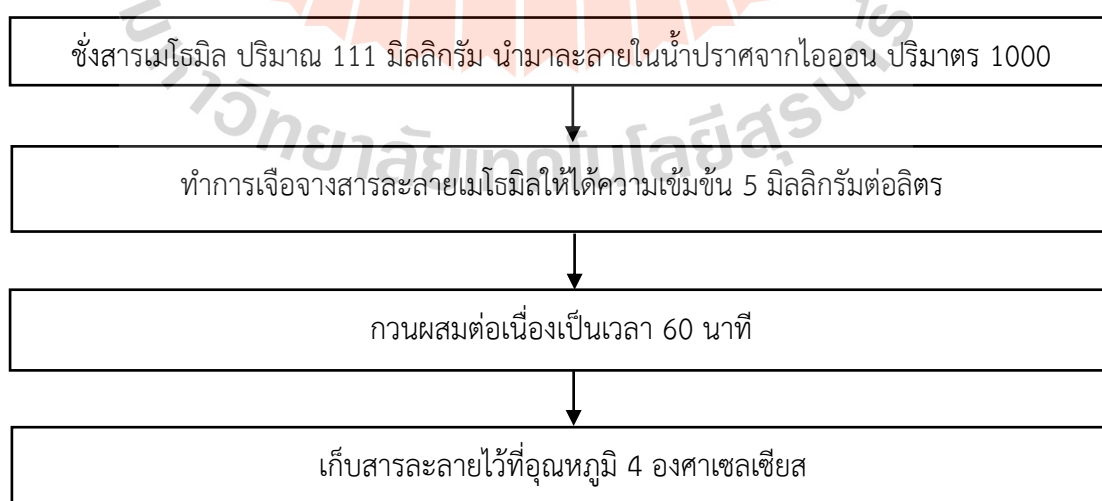
ตารางที่ 3.1 วิเคราะห์คุณลักษณะสมบัติด้วยเครื่องมือต่างๆ

คุณลักษณะสมบัติ	เทคนิคที่ใช้
สัณฐานวิทยาและโครงสร้างของแอโรเจล	เครื่องวิเคราะห์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
หมู่ฟังก์ชันของสารประกอบอินทรีย์	เครื่องวิเคราะห์ฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FTIR)
โครงสร้างผลึกของเซลลูโลส	เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)
พื้นที่ผิวจำเพาะของแอโรเจล	เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและหาความพรุนของอนุภาค (BET)
การกระจายขององค์ประกอบภายในของตัวอย่างได้แบบสามมิติ	เครื่องวิเคราะห์ถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์สามมิติระดับจุลภาคด้วยเอกซเรย์ย่านพลังงานสูงจากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอน (XTM)
วิเคราะห์ความเข้มข้นของสารเมโรมิล	เครื่องวิเคราะห์โครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (HPLC)

3.3 การบำบัดสารเมโรมิล

3.3.1 การเตรียมสารละลายเมโรมิล

การเตรียมละลายเมโรมิลจะเตรียมที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งทำการชั่งสารเมโรมิล ปริมาณ 111 มิลลิกรัม โดยนำมาละลายในน้ำปราศจากไอออน ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร จากนั้นทำการเจือจางสารละลายเมโรมิลให้ได้ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อใช้ในการทำการทดลองและทำการกวนผสมต่อเนื่องเป็นเวลา 60 นาที จากนั้นเก็บสารละลายไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส มีรายละเอียดขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 3.6 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.6 การเตรียมสารละลายเมโรมิล

3.3.2 การเตรียมสารละลายโซเดียมเปอร์ซัลเฟต

การเตรียมละลายโซเดียมเปอร์ซัลเฟต จะเตรียมที่ความเข้มข้น 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งทำการชั่งสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟต ปริมาณ 1,110 มิลลิกรัม โดยนำมาละลายในน้ำปราศจากไอออน ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เพื่อใช้ในการทำการทดลองและทำการกวนผสมต่อเนื่องเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเก็บสารละลายไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส มีรายละเอียดขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 3.7 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.7 การเตรียมสารละลายโซเดียมเปอร์ซัลเฟต

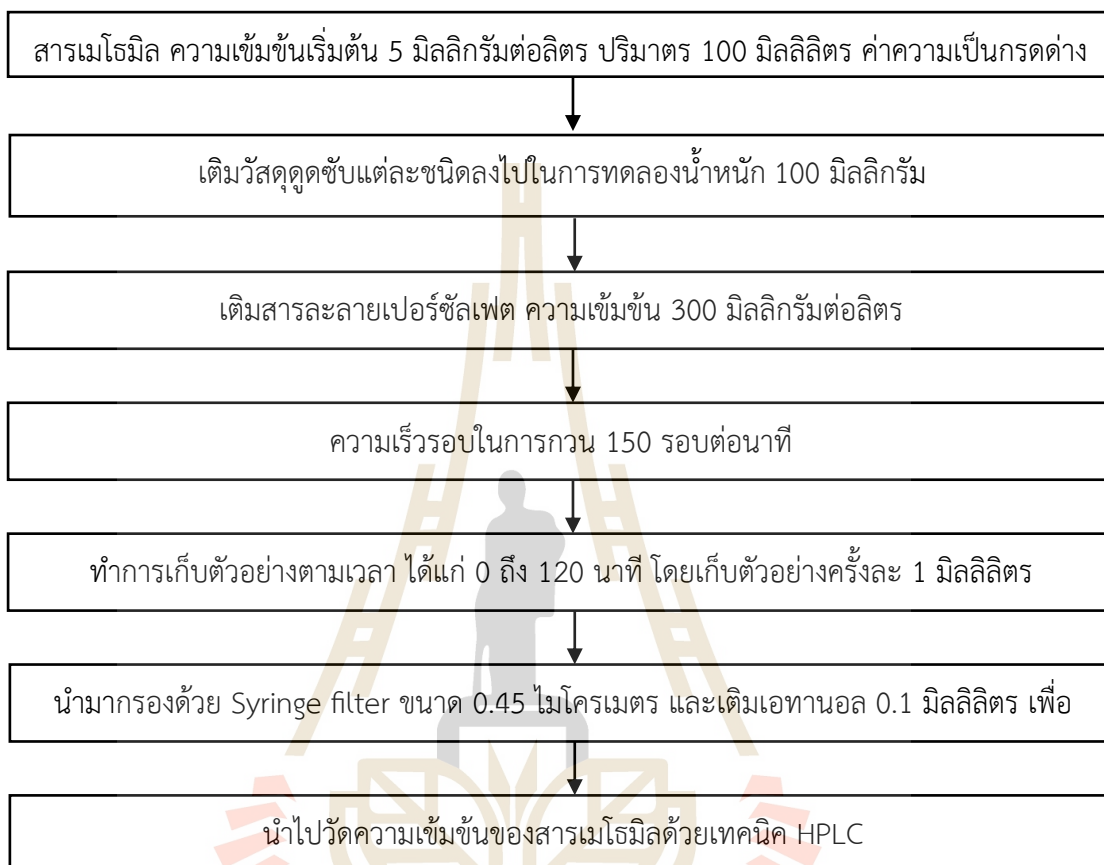
3.3.3 การศึกษาปัจจัยในการบำบัดสารเมโรมิล

การสังเคราะห์วัสดุดูดซับแอรโอเจลและสังเคราะห์วัสดุดูดซับแอรโอเจลที่ผสมสังกะสีประจุศูนย์ซัลไฟด์ ซึ่งประกอบด้วยส่วนของการกำจัดสารเมโรมิลร่วมกับสารเปอร์ซัลเฟต โดยในการกำจัดสารเมโรมิลร่วมกับสารเปอร์ซัลเฟตทำการศึกษปัจจัยในการกำจัด ดังนี้ ชนิดของแอรโอเจล ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเปอร์ซัลเฟต ระยะเวลาสัมผัส ความเร็วรอบในการกวน และค่าความเป็นกรดต่าง ทำการตรวจวัดความเข้มข้นของสารเมโรมิลด้วยเทคนิค HPLC และศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารเมโรมิลเปรียบเทียบกับเวลา ซึ่งแสดงตามปัจจัยที่กล่าวมาตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.3.3.1 การศึกษาชนิดของแอรโอเจล

การทดลองศึกษาการบำบัดสารเมโรมิลร่วมกับสารเปอร์ซัลเฟต ซึ่งการทดลองเป็นแบบ Batch studies โดยใช้ภาชนะบรรจุปริมาตร 250 มิลลิลิตร โดยแต่ละชุดทดลองเติมสารละลายเมโรมิล ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นเติมสารละลายเปอร์ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของวัสดุแอรโอเจลชนิดต่าง ๆ ได้แก่ (1) แอรโอเจล (2) แอรโอเจลผสมสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ และ (3) แอรโอเจลที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ โดยใช้วัสดุแต่ละชนิดในปริมาณ 100 มิลลิกรัม การทดลองทั้งหมดดำเนินภายใต้ความเร็วรอบในการกวนที่ 150 รอบต่อนาที และใช้ระยะเวลาสัมผัส 120 นาที มีการ

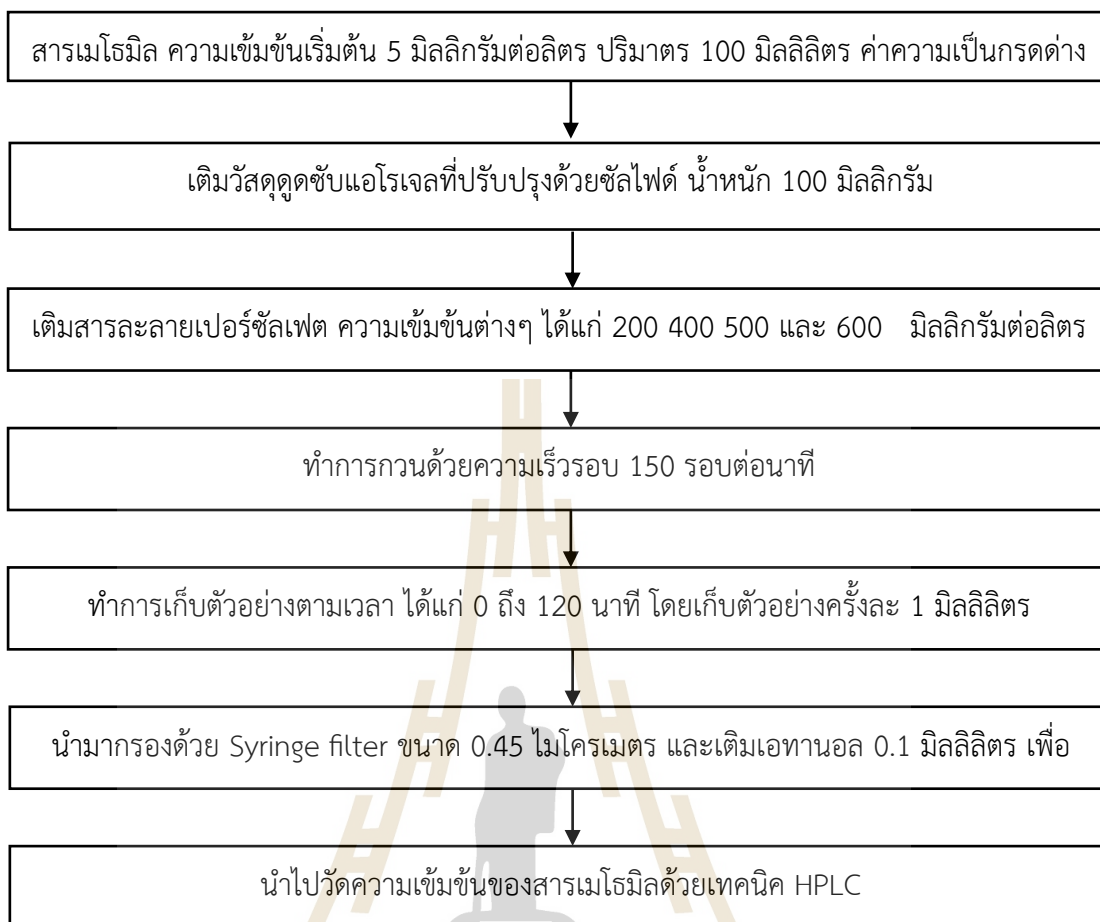
เก็บตัวอย่างน้ำในช่วงเวลาต่าง ๆ เพื่อนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของเมโรซิลด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (HPLC) ผลการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 การศึกษาชนิดของแอรโรเจล

3.3.3.2 การศึกษาความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟต

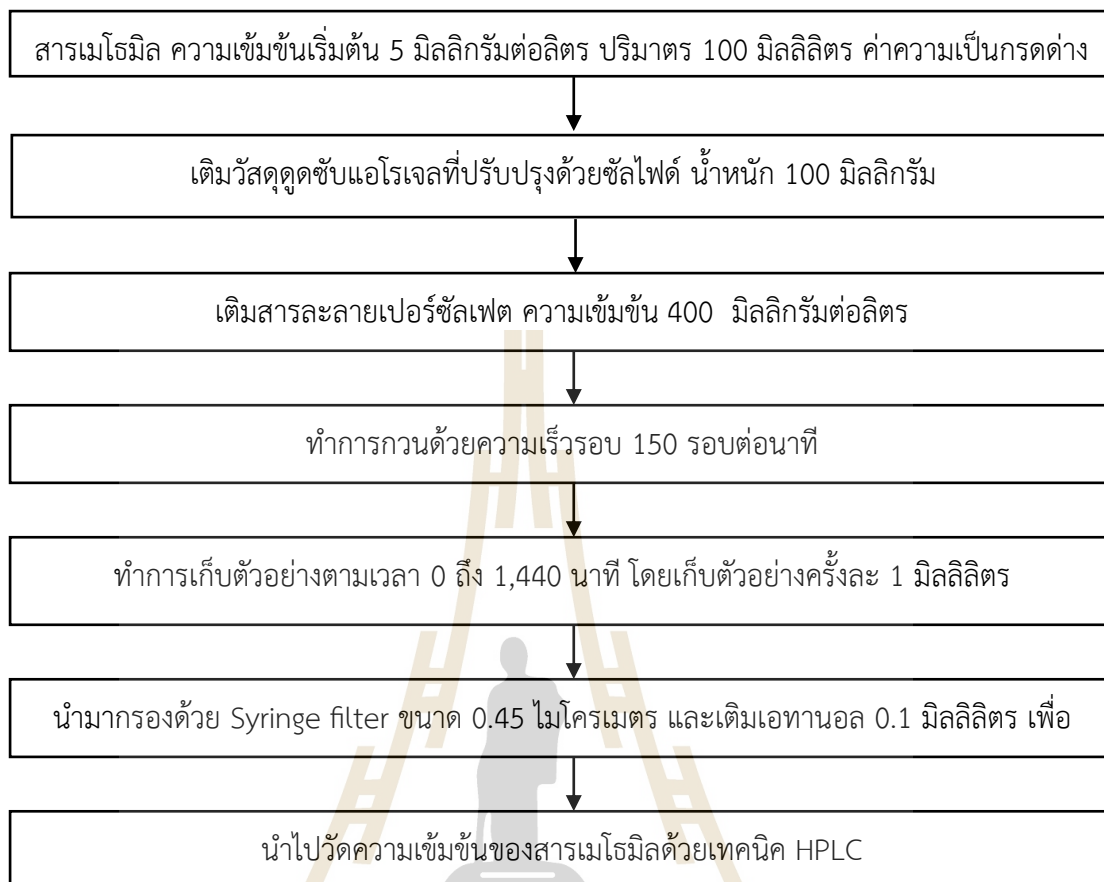
การทดลองการศึกษาการบำบัดสารเมโรซิลร่วมกับสารเปอร์ซัลเฟตด้วยแอรโรเจลที่ปรับปรุงด้วยซิลไฟต์ ซึ่งการทดลองเป็นแบบ Batch studies ในภาชนะบรรจุ ขนาด 250 มิลลิลิตร โดยสารเมโรซิลในการทดลองมีปริมาตร 100 มิลลิลิตร ซึ่งสารเมโรซิลมีความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร เติมสารละลายเปอร์ซัลเฟตที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ได้แก่ 200, 400 500 และ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร และนำวัสดุดูดซับแอรโรเจลที่ปรับปรุงด้วยซิลไฟต์ เติมนลงในภาชนะทดลองด้วยน้ำหนัก 100 มิลลิกรัม และในการทดลองมีการกวนที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที โดยใช้ระยะเวลาในการสัมผัส 120 นาที ซึ่งทำการเก็บตัวอย่างน้ำตามเวลา จากนั้นวิเคราะห์ความเข้มข้นของเมโรซิลด้วยเทคนิค HPLC แสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 การศึกษาความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟต

3.3.3.3 การศึกษาระยะเวลาในการสัมผัส

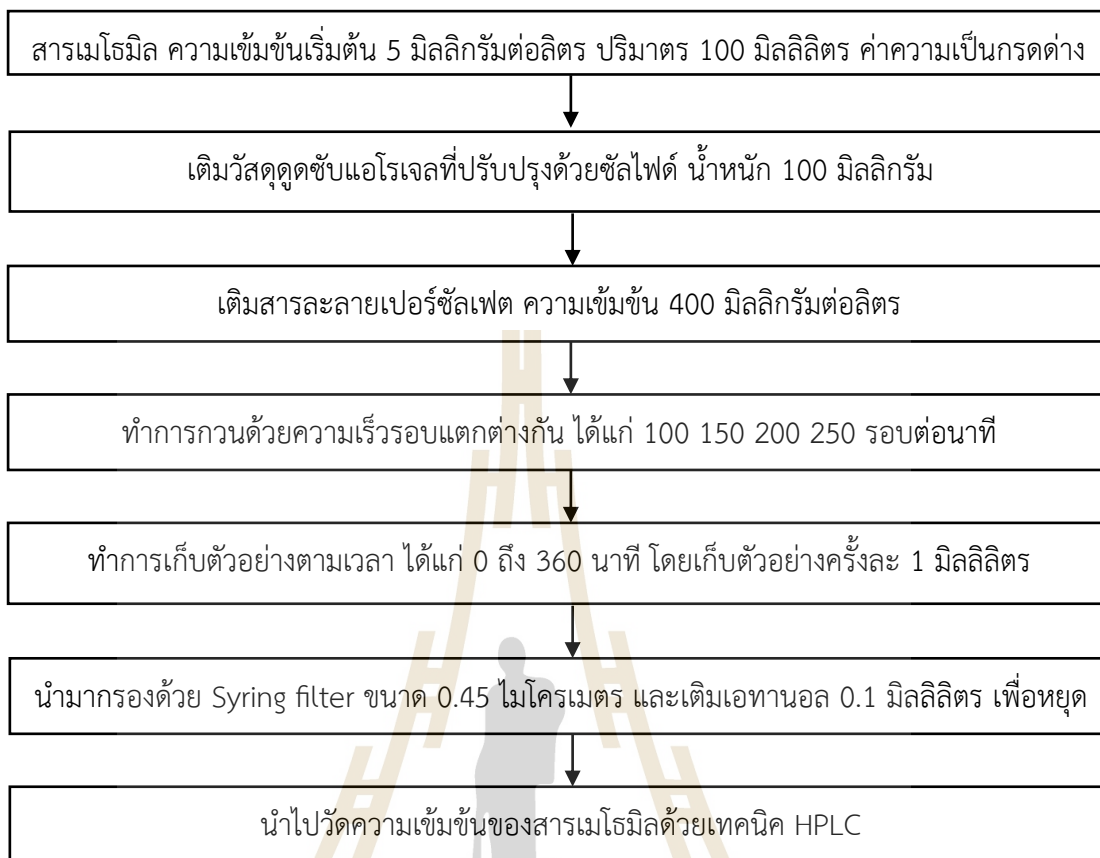
การทดลองการศึกษาการบำบัดสารเมโทมิลร่วมกับสารเปอร์ซัลเฟตด้วยแอโรเจลที่ปรับปรุงด้วยซิลไฟด์ ซึ่งการทดลองเป็นแบบ Batch studies ในภาชนะบรรจุ ขนาด 250 มิลลิลิตร โดยสารเมโทมิลในการทดลองมีปริมาตร 100 มิลลิลิตร ซึ่งสารเมโทมิลมีความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร เติมสารละลายเปอร์ซัลเฟตที่มีความเข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อลิตร และนำวัสดุดูดซับแอโรเจลที่ปรับปรุงด้วยซิลไฟด์ เติมลงในทดลองด้วยน้ำหนัก 100 มิลลิกรัม และในการทดลองมีการกวนที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที โดยใช้ระยะเวลาในการสัมผัส 1,440 นาที หรือ 24 ชั่วโมง ซึ่งทำการเก็บตัวอย่างน้ำตามเวลา จากนั้นวิเคราะห์ความเข้มข้นของเมโทมิลด้วยเทคนิค HPLC แสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 การศึกษาระยะเวลาในการสัมผัส

3.3.3.4 การศึกษาความเร็วรอบในการกวน

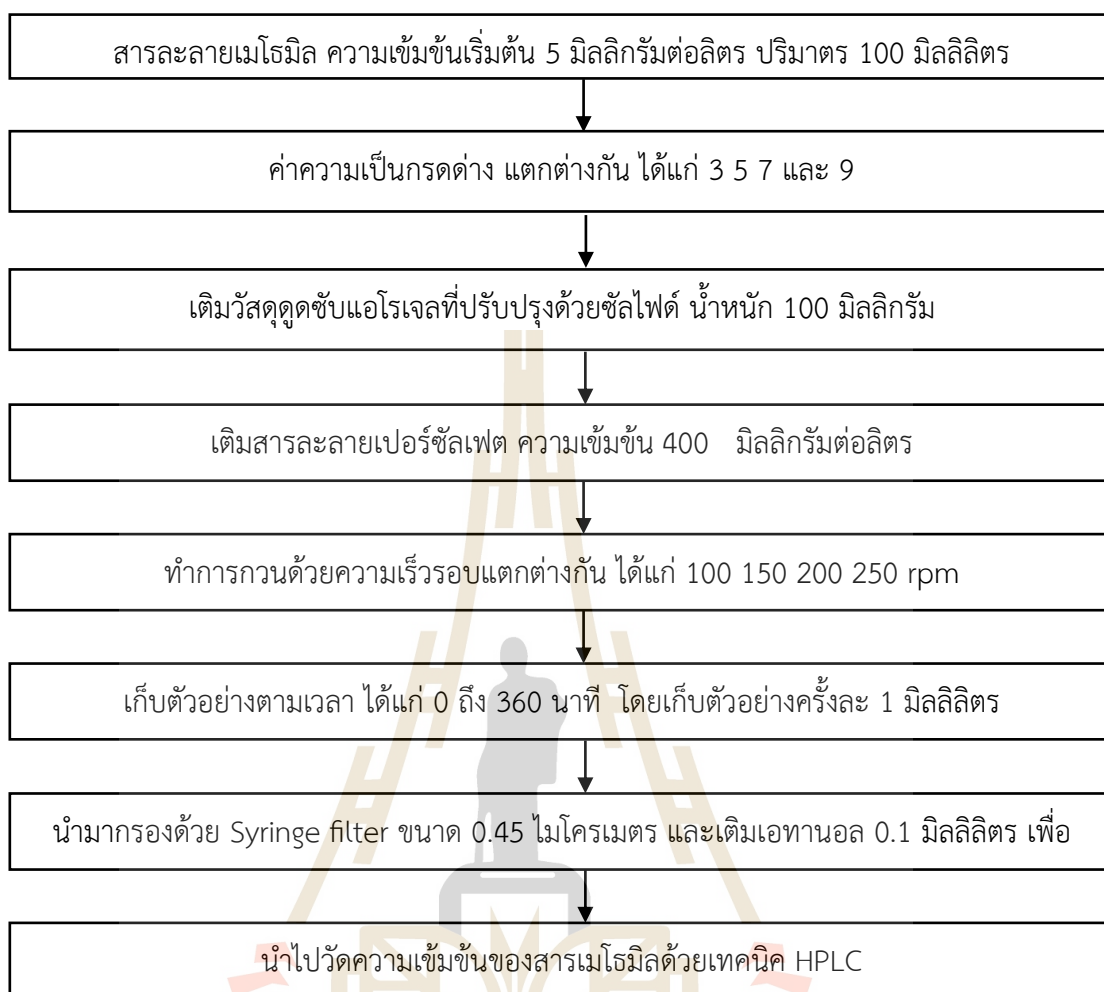
การทดลองการศึกษากำบัตสารเมโทซิลร่วมกับสารเปอร์ซัลเฟตด้วยแอโรเจลที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ ซึ่งการทดลองเป็นแบบ Batch studies ในภาชนะบรรจุ ขนาด 250 มิลลิลิตร โดยสารเมโทซิลในการทดลองมีปริมาตร 100 มิลลิลิตร ซึ่งสารเมโทซิลมีความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร เติมสารละลายเปอร์ซัลเฟตที่มีความเข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อลิตร และนำวัสดุดูดซับแอโรเจลที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ เติมลงในทดลองด้วยน้ำหนัก 100 มิลลิกรัม และในการทดลองมีการกวนความเร็วรอบที่แตกต่างกัน ได้แก่ ความเร็วรอบในการกวน ได้แก่ 100 150 200 และ 250 รอบต่อนาที โดยใช้ระยะเวลาในการสัมผัส 360 นาที หรือ 6 ชั่วโมง ซึ่งทำการเก็บตัวอย่างน้ำตามเวลา จากนั้นวิเคราะห์ความเข้มข้นของเมโทซิลด้วยเทคนิค HPLC แสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 การศึกษาความเร็วรอบในการกวน

3.3.3.5 การศึกษาค่าความเป็นกรดต่าง

การทดลองการศึกษากำบัตสารเมโธมิลร่วมกับสารเปอร์ซัลเฟตด้วยแอโรเจลที่ปรับปรุงด้วยซิลไฟด์ ซึ่งการทดลองเป็นแบบ Batch studies ในภาชนะบรรจุ ขนาด 250 มิลลิลิตร โดยสารเมโธมิลในการทดลองมีปริมาตร 100 มิลลิลิตร ซึ่งสารเมโธมิลมีความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรดต่างที่แตกต่างกัน ได้แก่ 3 5 7 และ 9 เติมสารละลายเปอร์ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อลิตร และนำวัสดุดูดซับแอโรเจลที่ปรับปรุงด้วยซิลไฟด์ เติมลงใน การทดลองด้วยน้ำหนัก 100 มิลลิกรัม และในการทดลองมีการกวนตามความเร็วรอบที่แตกต่างกัน ได้แก่ 100 150 200 250 รอบต่อนาที โดยใช้ระยะเวลาในการสัมผัส 360 นาที ซึ่งทำการเก็บตัวอย่างน้ำตามเวลา จากนั้นวิเคราะห์ความเข้มข้นของเมโธมิลด้วยเทคนิค HPLC แสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 การศึกษาค่าความเป็นกรดต่าง

3.4 การวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของสารเมโรมิล

การวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของสารเมโรมิลด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง รุ่น HPLC 1260 DAD_FLD เป็นเทคนิควิเคราะห์ที่ใช้สำหรับแยก ระบุ และวัดปริมาณของสารประกอบในตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการของการเคลื่อนที่ผ่านเฟสที่แตกต่างกัน (Phase Separation) ซึ่งประกอบด้วยเฟสเคลื่อนที่ (Mobile Phase) และเฟสอยู่กับที่ (Stationary Phase) ซึ่งมีการเตรียมสารละลายมาตรฐานสารละลายเมโรมิลที่มีความเข้มข้น 0.5 1 2.5 5 10 20 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร นำมาวิเคราะห์เพื่อสร้างเป็นกราฟมาตรฐานของสารละลายเมโรมิล ซึ่งในการทดลองใช้สภาวะที่เหมาะสมตามตารางที่ 3.2 จากนั้นจะทำการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารเมโรมิลเปรียบเทียบกับเวลา

ตารางที่ 3.2 การวิเคราะห์สารละลายเมไธมิลด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง

ตัวแปร	สถานะที่เหมาะสม
1.คอลัมน์	Hypersil ODS, C18 (5 ไมโครเมตร, 4.0× 250 นาโนเมตร)
2.สัดส่วนเฟสเคลื่อนที่	A (ร้อยละ 65) คือ อะซิโตนไนไตรท์ B (ร้อยละ 35) คือ น้ำปราศจากไอออน
3.ปริมาณของสารที่ฉีดเข้าเครื่อง	20 ไมโครลิตร
4.อัตราการไหล	0.5 มิลลิลิตรต่อนาที
5.ระยะเวลาการวิเคราะห์ตั้งต้น	15 นาที
6.ความยาวคลื่น	234 นาโนเมตร

คำนวณประสิทธิภาพการบำบัดสารละลายเมไธมิล

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

เมื่อ C_0 = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเมไธมิล

C_t = ความเข้มข้นของสารละลายเมไธมิลหลังการทดลอง ตามเวลาต่าง ๆ

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปราย

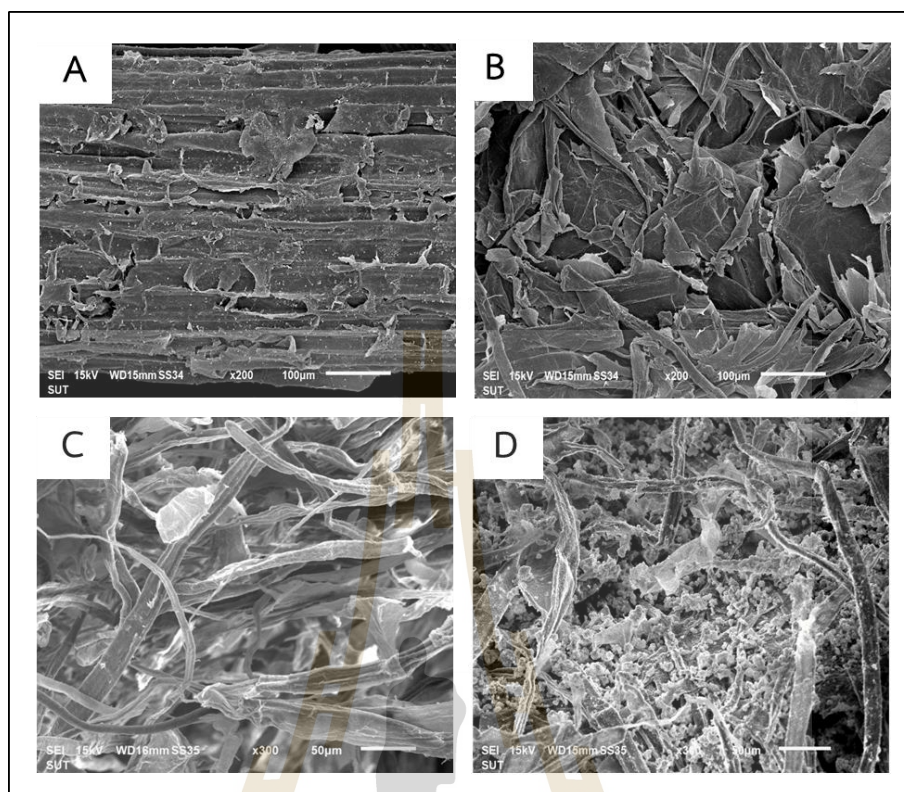
งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสังเคราะห์วัสดุดูดซับแอโรเจลผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์โดยวัตถุดิบที่ใช้สังเคราะห์นำมาจาก ชานอ้อยจากอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาลเป็นการนำของเสียชานอ้อยที่เหลือทิ้งจากกระบวนการหีบอ้อย เพื่อเอาน้ำอ้อยออกนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์มากขึ้นและเพิ่มมูลค่าของเสียอีกด้วย ซึ่งนำชานอ้อยมาสังเคราะห์เป็นวัสดุดูดซับแอโรเจลผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ จากนั้นนำวัสดุดูดซับแอโรเจลที่สังเคราะห์ได้ไปใช้ในการบำบัดสารเมโรมิล ดังนั้นผลการศึกษางานวิจัยนี้ประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ 1) การสังเคราะห์และศึกษาคุณลักษณะสมบัติของแอโรเจลผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ 2) การศึกษาการกำจัดสารเมโรมิลร่วมกับสารเปอร์ซัลเฟตโดยใช้วัสดุที่สังเคราะห์ขึ้น

4.1 ผลการสังเคราะห์และศึกษาคุณลักษณะสมบัติของแอโรเจลผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์

จากการสังเคราะห์วัสดุดูดซับแอโรเจลผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ มีขั้นตอนการสังเคราะห์ทั้งหมด 3 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนการปรับสภาพของเสียชานอ้อย ขั้นตอนการสังเคราะห์แอโรเจล และขั้นตอนการสังเคราะห์แอโรเจลผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ 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) แอโรเจลผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซิลไฟด์ที่กำลังขยาย 300X (D)

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

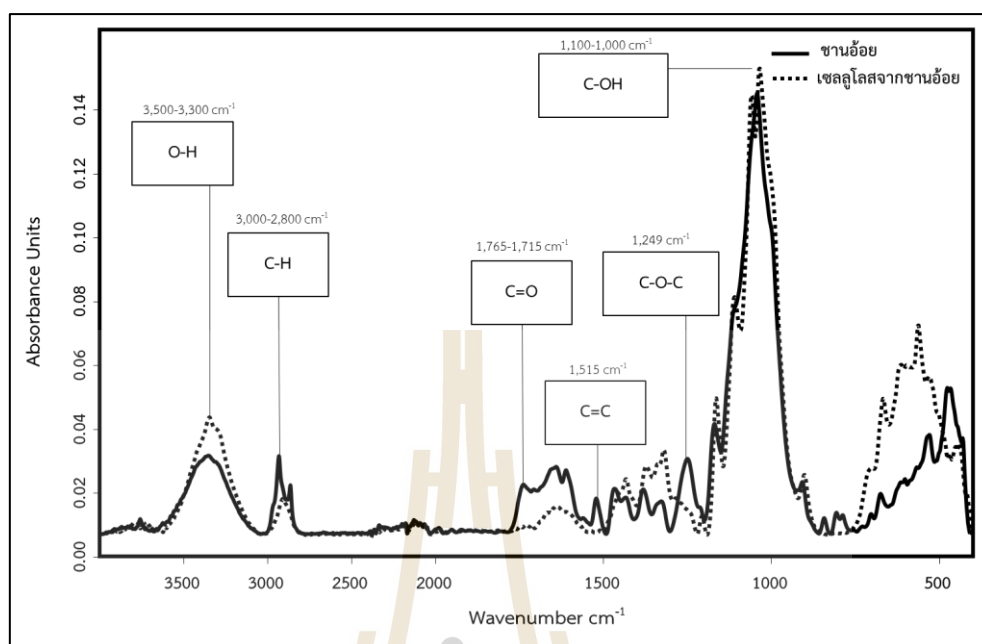
จากเส้นใยเซลลูโลส ทำให้เส้นใยที่ได้มีสีขาวขึ้นและมีการกระจายตัวดีขึ้น ซึ่งเป็นผลจากกระบวนการออกซิเดชันที่ช่วยสลายพันธะคาร์บอน-ออกซิเจนภายในโครงสร้างลิกนินและช่วยให้เซลลูโลสบริสุทธิ์มากขึ้น หลังจากนั้นจึงทำให้แห้งและนำมาขึ้นรูปเป็นวัสดุดูดซับแอโรเจล พบว่ารูปที่ 4.1 (C) ซึ่งเป็นแอโรเจลจากเซลลูโลสขานอ้อยแสดงโครงสร้างที่มีรูพรุนซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของแอโรเจล 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

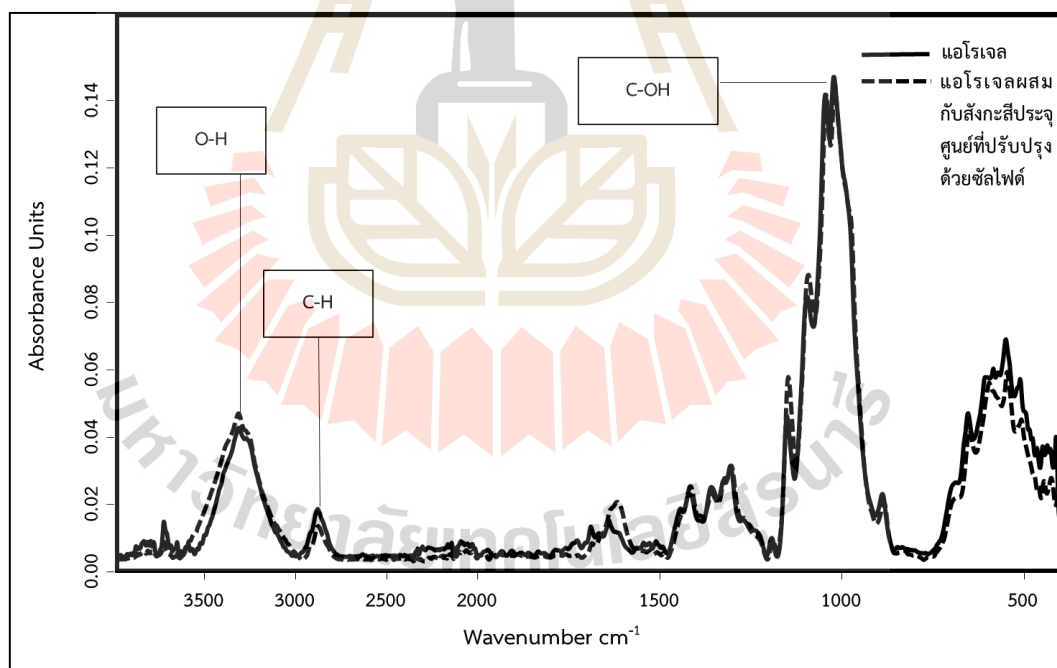
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



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 ซึ่งเกี่ยวข้องกับโครงสร้างของเซลล์ูโลสและเอมิเซลล์ูโลส 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 เมื่อทำการปรับสภาพทางเคมีโดยใช้สารละลายไฮเดรอกไซด์ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และกรดซัลฟิวริก พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญในสเปกตรัม FTIR โดยไม่มีการปรากฏของสัญญาณที่เลขคลื่น $1,732 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นค่าลักษณะเฉพาะของหมู่คาร์บอนิล (C=O) ในเอมิเซลล์ูโลส และไม่มีสัญญาณที่ $1,520 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของพันธะโครงสร้างอะโรมาติกในลิกนิน ส่งผลให้สามารถยืนยันได้ว่ากระบวนการปรับสภาพทางเคมีสามารถกำจัดเอมิเซลล์ูโลสและลิกนินออกจากเส้นใยชานอ้อยได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างของเส้นใยที่ได้รับการยืนยันจากผลการวิเคราะห์ทางสเปกโทรสโกปี สัญญาณของเซลล์ูโลสยังคงสามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนหลังการปรับสภาพ ซึ่งบ่งชี้ว่ากระบวนการดังกล่าวสามารถคัดแยกเซลล์ูโลสบริสุทธิ์ออกจากชานอ้อยได้โดยไม่ทำให้เกิดการทำลายโครงสร้างของเซลล์ูโลส นอกจากนี้การลดลงของ

สัญญาณที่เกี่ยวข้องกับลิกนินและเฮมิเซลลูโลสยังเป็นเครื่องยืนยันว่ากระบวนการปรับสภาพสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเซลลูโลส 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 ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ของเฮมิเซลลูโลสและ C-O-C ซึ่งเป็นสัญญาณของลิกนินลดลง อย่างเด่นชัดหลังการปรับสภาพ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีการกำจัดหรือการลดปริมาณของเฮมิเซลลูโลสและลิกนินออกจากเส้นใยอย่างชัดเจนในกระบวนการนี้ ทั้งนี้การกำจัดเฮมิเซลลูโลสและลิกนินมีความสำคัญในการปรับปรุงคุณสมบัติของเซลลูโลส เช่น การเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานเส้นใยในกระบวนการต่าง ๆ เช่น การผลิตวัสดุชีวภาพหรือเส้นใยที่มีคุณสมบัติเฉพาะที่ดีขึ้น



รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ FTIR ของแอโรเจล และแอโรเจลผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟต์

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

4.1.3 เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

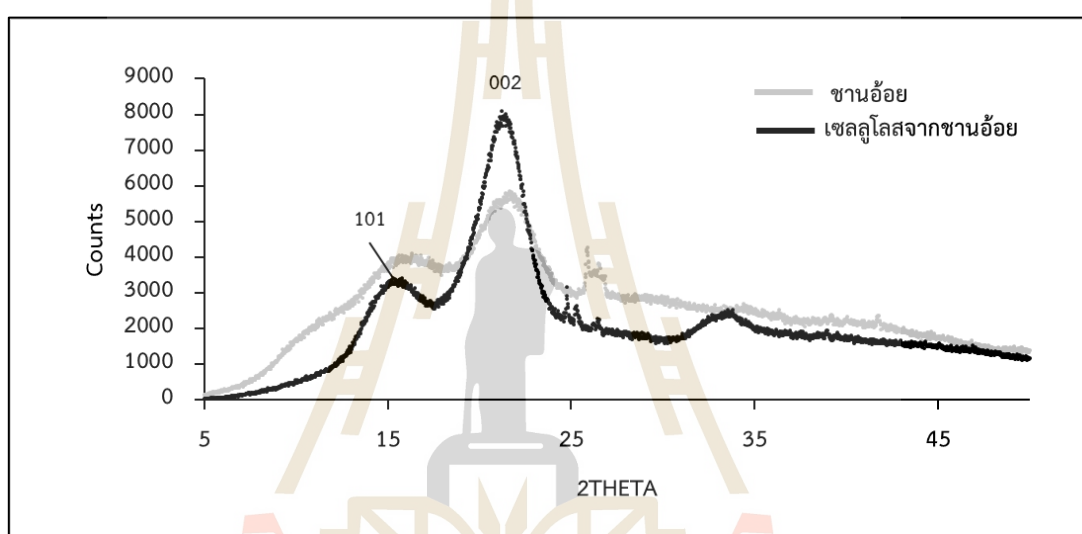
การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เป็นเทคนิคการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกใช้สำหรับศึกษาโครงสร้างผลึกเซลลูโลสของตัวอย่างโดยเฉพาะศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา ซึ่งในงานวิจัยนี้ ทำการศึกษาตัวอย่างขานอ้อยและเซลลูโลสจากขานอ้อยที่การปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ การศึกษา XRD เนื่องจากเซลลูโลสมีโครงสร้างเป็นผลึก และเฮมิเซลลูโลสและลิกนินมีลักษณะเป็นอสัณฐาน โดยพีคที่แสดงความเป็นผลึกมีค่า 2θ ที่ 22° หรือระนาบ 002 และพีคอสัณฐานมีค่า 2θ ที่ 16° หรือระนาบ 101 จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่าเมื่อมีการปรับสภาพทางเคมีแล้วพบว่าค่าความเป็นผลึกสูงขึ้นกว่าขานอ้อยที่ยังไม่ผ่านการปรับสภาพ 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

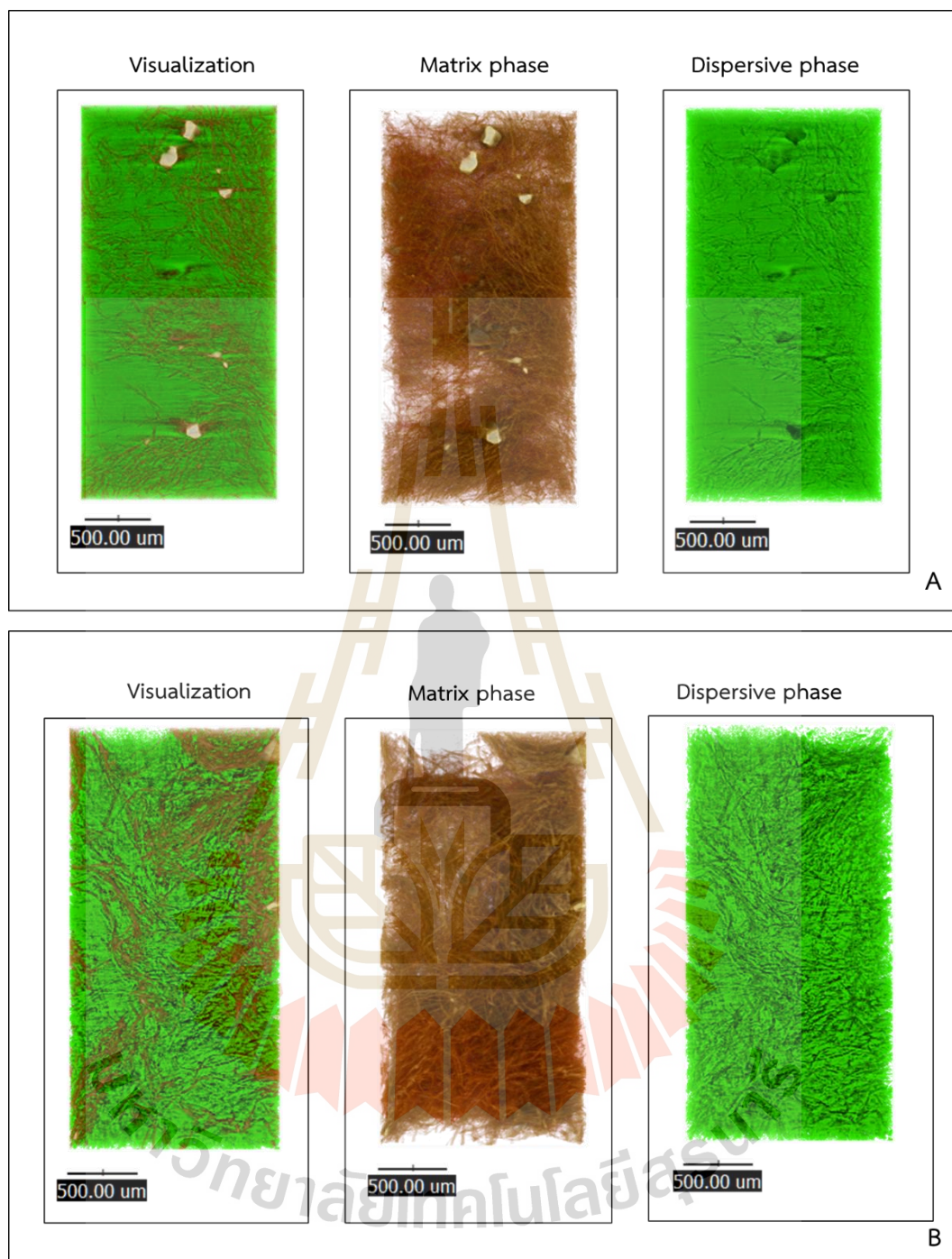
ตัวอย่าง	Single point BET (m ² /g)	Total pore volume (cc/g)
แอโรเจล	0.7125	0.000267
แอโรเจลผสมสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์	0.4996	0.000141

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 การเติมสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ส่งผลต่อกลไกการกำจัดเมธิลโดยเพิ่มประสิทธิภาพในการรีดักชันของสารเมธิล 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

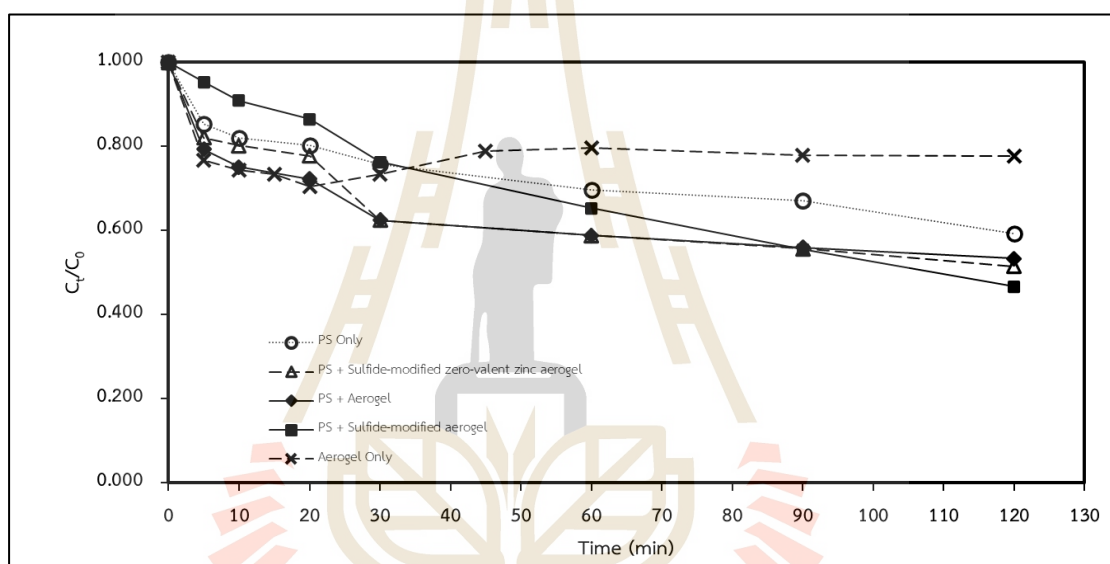
จากรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างที่ชัดเจนในโครงสร้างภายในระหว่างตัวอย่างแอโรเจล (A) และตัวอย่างของแอโรเจลผสมสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ (B) การวิเคราะห์เชิงปริมาณจากเทคนิค XTM พบว่าตัวอย่างแอโรเจลมีค่าความพรุนสูงถึงร้อยละ 88.43 ซึ่งจะทำให้เห็นว่าโครงสร้างของวัสดุมีความโปร่งสูงและมี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

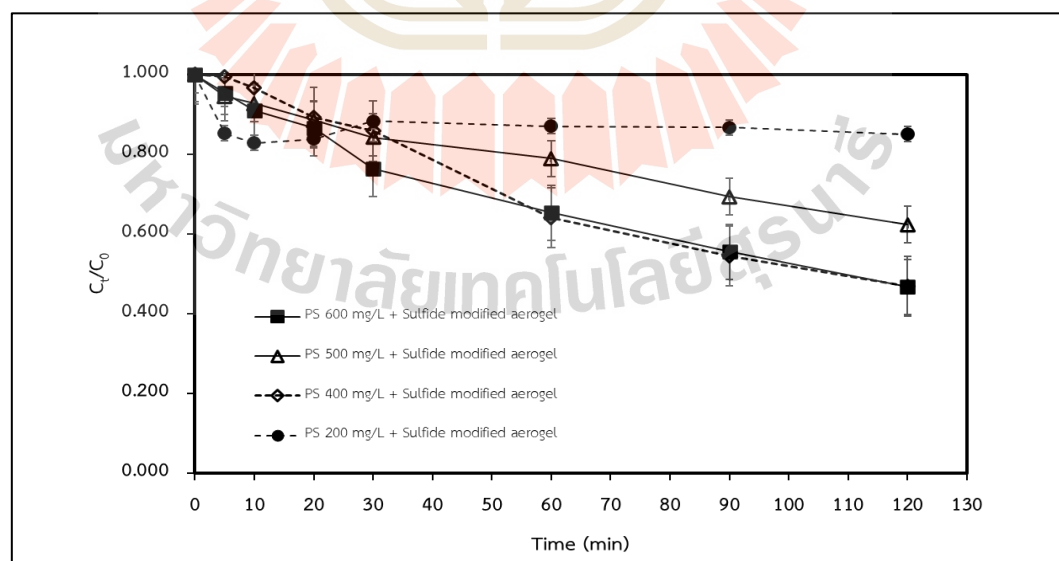
จากการศึกษาชนิดของแอโรเจลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมโรมิส แสดงดังรูปที่ 4.6 พบว่าจากการทดลองมีการใช้วัสดุดูดซับแอโรเจลเพียงอย่างเดียว (Aerogel Only) ในการกำจัดสารเมโรมิสซึ่งผลการศึกษา พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมโรมิสต่ำประมาณร้อยละ 20.4 และมีการใช้สารเปอร์ซัลเฟตอย่างเดียว (PS Only) ในการกำจัดสารเมโรมิสจากการศึกษา 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 การใช้แอร์เจลผสมสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟต์ในการกำจัดสารเมโรไมลร่วมกับสารเปอร์ซัลเฟตมีประสิทธิภาพประมาณร้อยละ 48.5 และการใช้แอร์เจลที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟต์ในการกำจัดสารเมโรไมลร่วมกับสารเปอร์ซัลเฟตมีประสิทธิภาพสูงสุดถึงร้อยละ 53.3 อย่างไรก็ตามการใช้แอร์เจลที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟต์อาจเพิ่มความสามารถในการกำจัดสารเมโรไมลได้ เนื่องจากซัลไฟต์สามารถทำปฏิกิริยาหรือกระตุ้นสารเปอร์ซัลเฟตทำให้เกิดเป็นอนุมูลอิสระซัลเฟตที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์สูง (Yuan et al., 2015) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์มลพิษ โดยงานวิจัยของ Dong et al. (2019) สอดคล้องกับผลการศึกษาข้างต้น พบว่าซัลไฟต์สามารถช่วยกระตุ้นเปอร์ซัลเฟตได้โดยปรับแต่งพื้นผิวเหล็กประจุศูนย์และเพิ่มการเกิดอนุมูลอิสระส่งผลให้กระบวนการกำจัดซัลฟามาเทาซันมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ดังนั้นในการศึกษาจึงเลือกใช้วัสดุดูดซับแอร์เจลที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟต์เป็นวัสดุหลักในการกำจัดสารเมโรไมลร่วมกับสารเปอร์ซัลเฟตในการศึกษาปัจจัยต่อไป เนื่องจากเป็นวัสดุดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมโรไมลสูงที่สุด และศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ ที่อาจมีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมโรไมลต่อไป

4.2.2 ผลของการศึกษาความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟตต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมโรไมล

ผลการศึกษาความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟตต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมโรไมล โดยศึกษาความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟตทั้งหมด 4 ความเข้มข้น ได้แก่ 200 400 500 และ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร การศึกษาครั้งนี้ใช้วัสดุดูดซับแอร์เจลที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟต์ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของสารเมโรไมลเริ่มต้นเท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเร็วรอบในการกวน 150 รอบต่อนาที และค่าความเป็นกรดต่างของสารเมโรไมลเริ่มต้นเท่ากับ 7



รูปที่ 4.7 ผลของการศึกษาความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟตต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมโรไมล โดยใช้แอร์เจลที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟต์ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

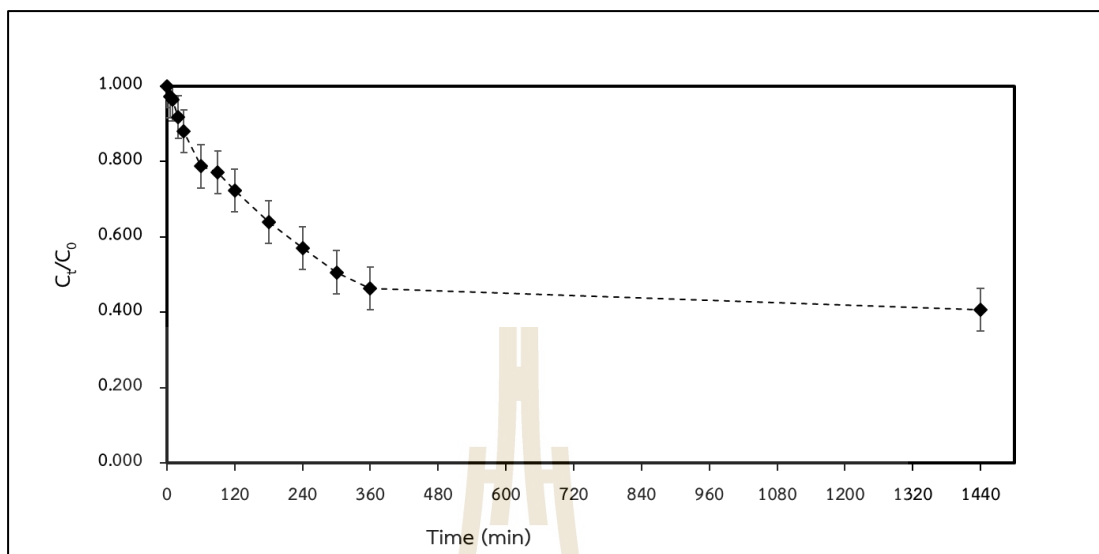
จากผลการศึกษาการกำจัดสารเมโรไมล์ร่วมกับสารละลายเปอร์ซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ได้แก่ 200 400 500 และ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงดังรูปที่ 4.7 พบว่าการใช้แอรโรเจลที่ปรับปรุงด้วยซิลไฟด์ร่วมกับสารละลายเปอร์ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพสูงที่สุดถึงร้อยละ 53.1 รองมาที่ความเข้มข้น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



ดังนั้นในการศึกษาจึงได้เลือกใช้ความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟตที่ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากเป็นสถานะที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมโรไมล์สูงที่สุด และศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ ที่อาจมีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมโรไมล์ต่อไป

4.2.3 ผลของการศึกษาระยะเวลาการสัมผัสต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมโรไมล์

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



รูปที่ 4.8 ผลของการศึกษาระยะเวลาในการสัมผัสต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมไธมิล

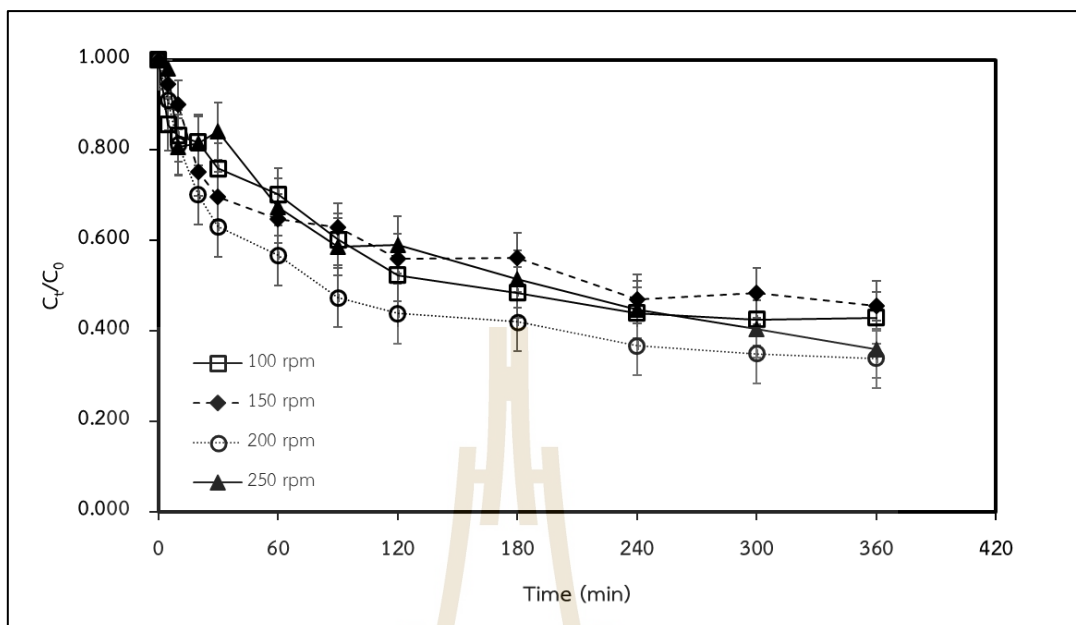
จากผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการกำจัดสารเมไธมิลโดยใช้แอโรเจลที่ปรับปรุงด้วยซิลไฟด์ร่วมกับสารละลายเปอร์ซัลเฟต แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมไธมิล โดยได้ทำการทดลองและเก็บตัวอย่างตามเวลา ได้แก่ 0 ถึง 1,440 นาที เพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพการกำจัดในแต่ละช่วงเวลา

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 ผลของการศึกษาผลของความเร็วรอบในการกวนต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมไธมิล

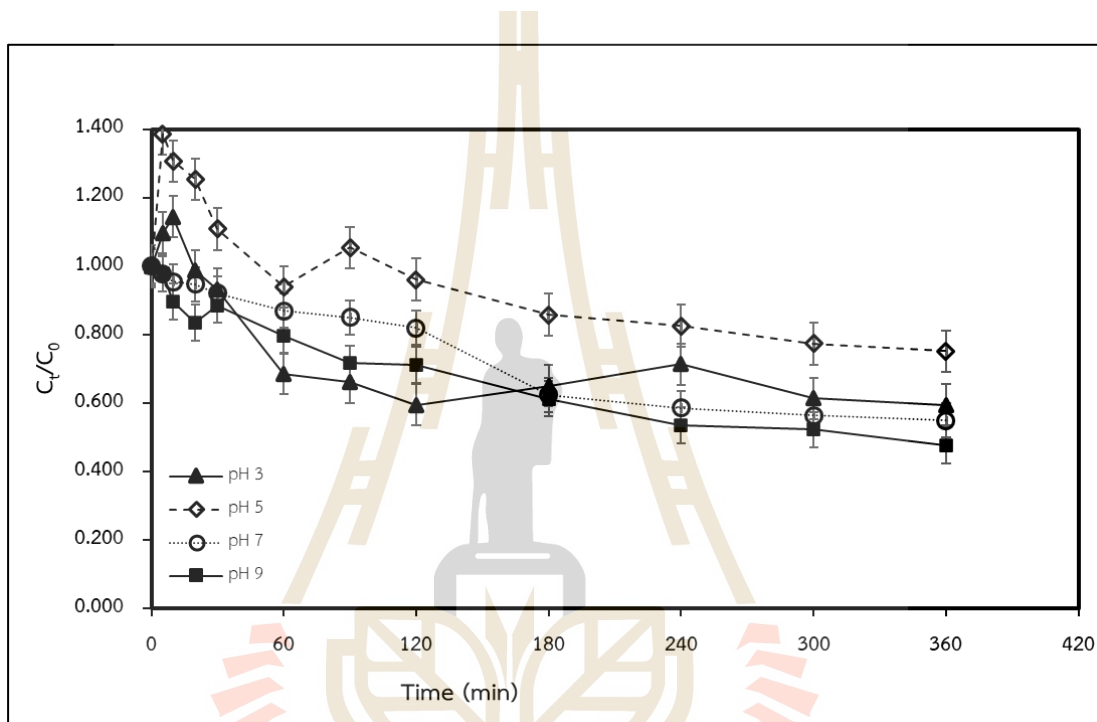
ผลการศึกษาความเร็วรอบในการกวนต่อการกำจัดสารเมไธมิลโดยใช้แอโรเจลที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ร่วมกับสารละลายเปอร์ซัลเฟต เพื่อหาค่าความเร็วรอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการกำจัดสารเมไธมิล โดยดำเนินการทดลองในความเร็วรอบที่ 100 150 200 และ 250 รอบต่อนาที

จากผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 4.9 พบว่าความเร็วรอบในการกวนส่งผลต่ออัตราการกำจัดของสาร เมไธมิล โดยที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที มีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงที่สุด คิดเป็นร้อยละ 65.1 รองลงมาคือความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที ซึ่งมีประสิทธิภาพการกำจัดรองลงมาเล็กน้อยคิดเป็นร้อยละ 64 ในขณะที่ความเร็วรอบ 100 และ 150 รอบต่อนาที มีประสิทธิภาพการกำจัดต่ำกว่าชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วรอบที่ 200 และ 250 รอบต่อนาที ซึ่งผลการศึกษานี้จะเห็นได้ว่าความเร็วรอบในการกวนต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมไธมิล พบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วรอบในการกวนจาก 100 เป็น 200 รอบต่อนาที ประสิทธิภาพในการกำจัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งสามารถอธิบายได้จากการเพิ่มขึ้นของอัตราการถ่ายเทมวลสารระหว่างสารละลายและวัสดุดูดซับรวมถึงการกระจายตัวที่ดีขึ้นของสารออกซิแดนท์หรือสารเร่งปฏิกิริยาในระบบ ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายสารเมไธมิลมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มความเร็วรอบเป็น 250 รอบต่อนาที ประสิทธิภาพในการกำจัดกลับลดลงเล็กน้อย ซึ่งอาจเกิดจากการสร้างแรงเฉือนที่มากเกินไป (Hamitouche et al., 2017)

ดังนั้นในการศึกษานี้จึงเลือกใช้ความเร็วรอบในการกวนที่ 200 รอบต่อนาที เพื่อศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ ที่อาจมีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมไธมิลต่อไป เนื่องจากเป็นความเร็วรอบที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมไธมิลที่สูงที่สุด

4.2.5 ผลของการศึกษาค่าความเป็นกรดต่างต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมโรไมล

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



รูปที่ 4.10 ผลของการศึกษาค่าความเป็นกรดต่างต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมโรไมล

จากการศึกษาค่าความเป็นกรดต่างต่อการกำจัดของสารเมโรไมลโดยใช้แอโรเจลที่ปรับปรุงด้วยซิลไฟต์ร่วมกับสารละลายเปอร์ซัลเฟต พบว่าค่าความเป็นกรดต่างมีผลสำคัญต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารเมโรไมล ซึ่งผลการศึกษาแสดงในรูปที่ 4.10 พบว่าค่าความเป็นกรดต่างที่ 9 มีประสิทธิภาพการกำจัดสูงที่สุดถึงร้อยละ 52.3 มีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดสารเมโรไมล สาเหตุหลักที่ทำให้ค่าความเป็นกรดต่างที่ 9 มีประสิทธิภาพมากกว่าค่าความเป็นกรดต่างอื่น ๆ อาจเกิดจากการกระตุ้นเปอร์ซัลเฟตที่ดีขึ้นในสภาวะต่าง ซึ่งทำให้เกิดอนุมูลอิสระซัลเฟตในปริมาณมาก แสดงดังสมการ 19 อนุมูลอิสระเหล่านี้เป็นสารออกซิแดนท์ที่มีศักยภาพสูงในการทำลายพันธะของเมโรไมล นอกจากนี้ที่ค่าความเป็นกรดต่างสูง อาจมีการเกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลเพิ่มขึ้น



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

อย่างไรก็ตามที่ค่าความเป็นกรดต่างต่ำกว่า 7 ประสิทธิภาพการกำจัดลดลง ซึ่งอาจเป็นเพราะสารเปอร์ซัลเฟตในสภาวะที่เป็นกรดมีแนวโน้มที่จะคงอยู่ในรูปที่มีปฏิกิริยาต่ำกว่า ทำให้ไม่สามารถสร้างอนุมูลอิสระได้อย่างมีประสิทธิภาพ แสดงดังสมการ 20 ถึง 21



นอกจากนี้ในสภาวะที่เป็นกลาง แสดงดังสมการ 22 ประสิทธิภาพของระบบลดลงเช่นกัน อาจเนื่องมาจากกลไกของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในสภาวะกลางมีความสมดุลมากขึ้นระหว่างสารเปอร์ซัลเฟตและอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้น ทำให้ความสามารถในการออกซิไดซ์ลดลงเมื่อเทียบกับค่าความเป็นกรดต่างที่ 9



ดังนั้นสรุปได้ว่าค่าความเป็นกรดต่างที่ 9 มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการกระตุ้นเปอร์ซัลเฟตเพื่อนำมาใช้ในการกำจัดเมโรไมต์ เนื่องจากสามารถสร้างอนุมูลอิสระซัลเฟตและอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Xie et al. (2012) พบว่าค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายส่งผลต่อกระบวนการย่อยสลายด้วยเปอร์ซัลเฟต เนื่องจากค่าความเป็นกรดต่างที่แตกต่างกันจะมีผลต่อการเกิดของอนุมูลอิสระ ซึ่งในสภาวะกรดอนุมูลอิสระซัลเฟตมีบทบาทสำคัญแม้จะมีศักยภาพรีดอกซ์ต่ำกว่าอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลส่งผลให้อัตราการย่อยสลายในสภาวะนี้ค่อนข้างช้า ขณะที่ในสภาวะต่างอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลมีบทบาทเด่นชัดกว่าแต่อนุมูลอิสระทั้งสองชนิดอาจสูญเสียประสิทธิภาพในสภาวะต่างสูง เนื่องจากทำปฏิกิริยากับไอออนไฮดรอกไซด์อย่างรวดเร็ว

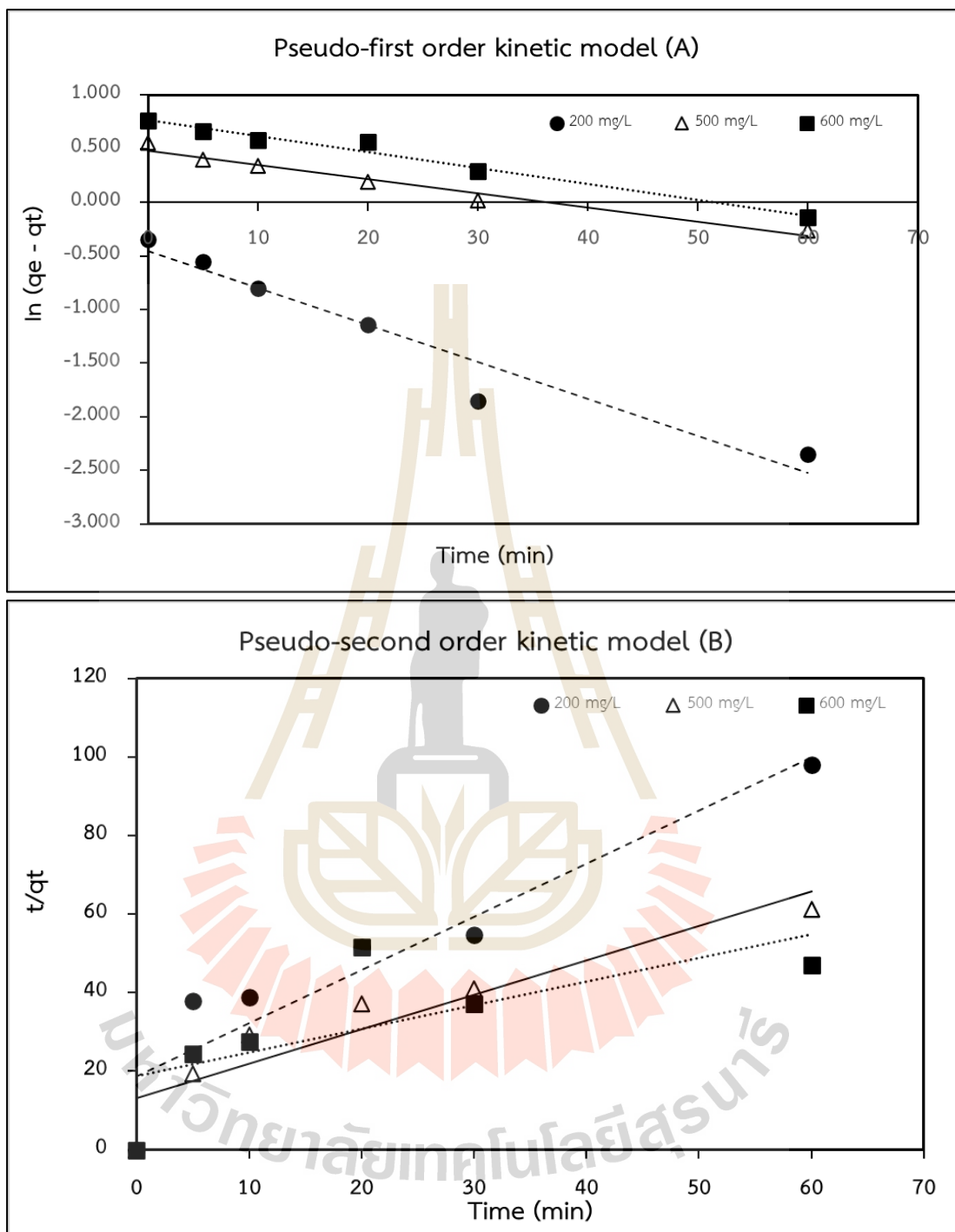
4.2.6 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การกำจัดสารเมโรไมต์ร่วมกับสารเปอร์ซัลเฟต

ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์เกี่ยวกับความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟตต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมโรไมต์ โดยศึกษาที่ความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟต 4 ความเข้มข้น ได้แก่ 200 400 500 และ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้วัสดุชุดขับแอร์เจสที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของสารเมโรไมต์เริ่มต้นเท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเร็วรอบในการกวน 150 รอบต่อนาที และค่าความเป็นกรดต่างเริ่มต้นเท่ากับ 7 เพื่อศึกษาอัตราเร็วของปฏิกิริยาการกำจัดสารเมโรไมต์ร่วมกับสารเปอร์ซัลเฟตด้วยแอร์เจสที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ 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) ที่ได้ศึกษากำจัดสารไซโปรฟลอกซาซินโดยใช้กระบวนการออกซิเดชันที่ถูกกระตุ้นด้วยโลหะศูนย์วาเลนซ์และพบว่าการกำจัดเป็นไปตามจลนพลศาสตร์แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม 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 กลไกของการเกิดปฏิกิริยาของการกำจัดสารเมโรมิลในการศึกษานี้

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

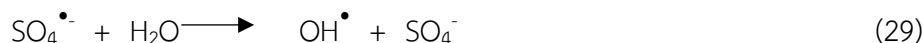
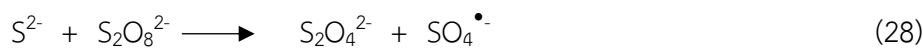


จากสมการที่ 25 สังกะสีประจุศูนย์จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและปล่อยอิเล็กตรอนออกมา ซึ่งอิเล็กตรอนเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของสารเมโรมิล (RX) ร่วมกับโปรตอน (H^+) ส่งผลให้พันธะภายในโมเลกุลอ่อนแอลงและเกิดการแตกตัว กลายเป็นผลิตภัณฑ์รีดิวซ์ที่มีความเป็นพิษลดลงหรือสามารถย่อยสลายได้ง่ายขึ้น ดังแสดงในสมการที่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

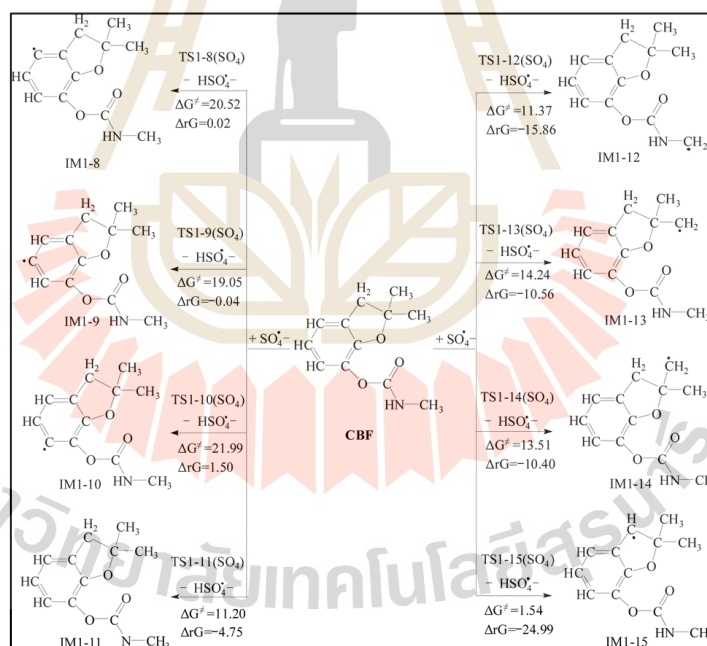
4.2.7.3 กลไกที่เกิดขึ้นกับการกำจัดเมโรมิลร่วมกับเปอร์ซัลเฟตโดยใช้แอโรเจลที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์

จากผลการทดลอง พบว่าการกำจัดเมโรมิลร่วมกับเปอร์ซัลเฟตโดยใช้แอโรเจลที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์มีประสิทธิภาพสูงขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้แอโรเจลเพียงอย่างเดียว ซึ่งเป็นผลมาจากกลไกการกำจัดที่ทำงานร่วมกันหลายกระบวนการ กลไกแรกคือการดูดซับทางกายภาพและทางเคมีของแอโรเจลซึ่งช่วยตรึงโมเลกุลของเมโรมิลไว้บนพื้นผิวของวัสดุ ทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ถัดมาคือกลไกการออกซิเดชันขั้นสูงที่เกิดจากการกระตุ้นสารเปอร์ซัลเฟตให้สลายตัวเป็นอนุมูลอิสระที่มีพลังงานสูง ได้แก่ อนุมูลอิสระซัลเฟต

และอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลซึ่งสามารถเข้าทำลายพันธะทางเคมีของสารเมโรมิลได้อย่างมีประสิทธิภาพ แสดงดังสมการ 28 ถึง 29

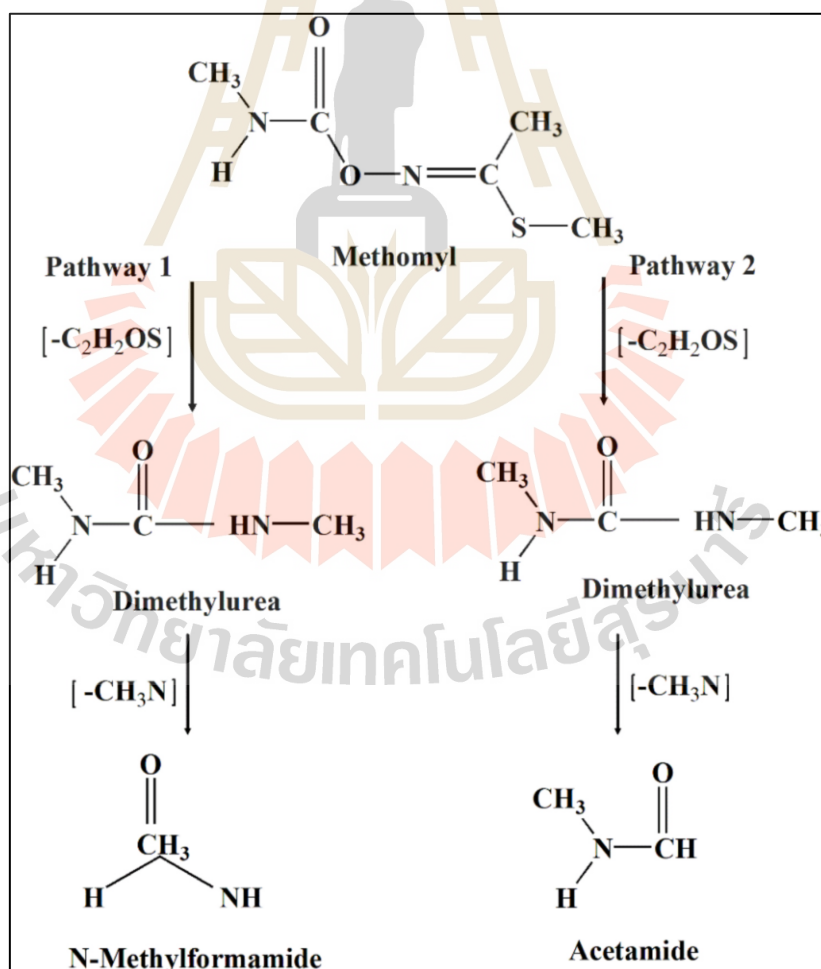


โดยบทบาทของซัลไฟด์ที่ปรับปรุงบนพื้นผิวของแอโรเจลช่วยเร่งการกระตุ้นเปอร์ซัลเฟตให้เกิดอนุมูลอิสระซัลเฟตได้เร็วขึ้นซึ่งมีศักยภาพสูงในการออกซิไดส์สารอินทรีย์ และอนุมูลอิสระซัลเฟตสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำหรือไฮดรอกไซด์ไอออนเพื่อสร้างอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล อย่างไรก็ตามอนุมูลอิสระซัลเฟตและอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของสารเมโรมิล 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 มีศักยภาพสูงในการออกซิไดส์สารมลพิษเปอร์ออกไซด์ซัลเฟต สามารถสร้างอนุมูลอิสระซัลเฟตมีพลังในการออกซิไดส์สูง เป็นต้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Hayat et al. (2021) ศึกษาเกี่ยวกับกลไกการสลายตัวของเมโธมิลในน้ำโดยใช้เปอร์ออกซีโมนโซลเฟต (PMS) ซึ่งเป็นกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (AOPs) ที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารปนเปื้อนในน้ำ พบว่าการเปลี่ยนแปลงของเมโธมิลไปเป็นแร่ธาตุเกิดขึ้นช้ากว่าและในปริมาณที่ต่ำซึ่งบ่งชี้ว่าเมโธมิลไม่ได้ย่อยสลายไปเป็นแร่ธาตุโดยตรง แต่จะเกิดเป็นสารตัวกลางก่อนการวิเคราะห์ด้วย HPLC-MS ซึ่งพบว่ามีสารตัวกลางหลักที่เกิดขึ้นมี 3 ชนิด ได้แก่ ไตเมทิลยูเรีย ($C_3H_8N_2O$) เอ็น-เมทิลฟอร์มามิด (C_2H_5NO) และ อะเซตามิด (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 โดยใช้อัลตราโซนิกคาวิตชัน (Ultrasonic Cavitation, UC) ร่วมกับสารเพิ่มประสิทธิภาพปฏิกิริยา (Process Intensifying Additives) พบว่าเมโรมิลซัลฟอกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์จากกระบวนการย่อยสลายด้วยกระบวนการเพนตัน (Fenton) และกระบวนการโอโซน (Ozone) นอกจากนี้งานวิจัยของ M. Tamimi et al. (2006) เป็นการศึกษาการสลายตัวของเมโรมิลด้วยกระบวนการโฟโตแคทาไลติก และได้กำหนดเส้นทางปฏิกิริยาพร้อมทั้งระบุผลิตภัณฑ์ตัวกลางที่เกิดขึ้น พบว่าเมโรมิลซัลฟอกไซด์เกิดขึ้นหลังจากการสลายตัวของเมโรมิลด้วยกระบวนการโฟโตแคทาไลติก (Photocatalytic) อีกทั้งยังระบุว่ วัน-เมทิลเอ็นไฮดรอกซีเมทิลคาร์บามอยล์ออกซีเอทานิโดไทโอเอตเป็นผลิตภัณฑ์รอง เนื่องจากพบกรดมีเทนซัลฟินิกอยู่ในสารละลายปฏิกิริยา ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมีบทบาทในการศึกษากระบวนการทางเคมีและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้กระบวนการเหล่านี้เป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการจัดการสารกำจัดศัตรูพืชที่ยั่งยืนและมีประสิทธิภาพ



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาการสังเคราะห์วัสดุดูดซับแอรโอเจลผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ โดยใช้ชานอ้อยจากของเสียภาคอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาลเป็นวัตถุดิบหลักในการสังเคราะห์วัสดุดูดซับดังกล่าว วัสดุดูดซับที่สังเคราะห์ได้ถูกนำไปใช้ในการกำจัดสารเมโรมิลร่วมกับสารเปอร์ซัลเฟต ซึ่งงานวิจัยนี้มีการศึกษาคุณลักษณะสมบัติของวัสดุดูดซับแอรโอเจลผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์เป็นส่วนสำคัญ รวมถึงการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมโรมิลภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ การศึกษาในงานวิจัยนี้จึงแบ่งออกเป็นสองส่วนหลัก ได้แก่ การสังเคราะห์และศึกษาคุณลักษณะสมบัติของวัสดุดูดซับแอรโอเจลผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ และการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมโรมิลโดยใช้วัสดุที่สังเคราะห์ขึ้น

5.1.1 การศึกษาคุณลักษณะสมบัติของแอรโอเจลผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์

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

จากการสังเคราะห์แอรโอเจลจากเซลลูโลสชานอ้อยผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ พบว่าโครงสร้างของวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน โดยการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM แสดงให้เห็นว่าอนุภาคสังกะสีกระจายตัวในบนพื้นผิวของแอรโอเจล และผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XTM พบว่าแอรโอเจลมีค่าความพรุนลดลงเมื่อมีการผสมสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ ซึ่งคาดว่าเกิดจากการอนุภาคของสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ภายในโครงสร้างของแอรโอเจล ทำให้บางส่วนของรูพรุนถูกปิดกั้น นอกจากนี้ การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET ยังแสดงให้เห็นว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของแอรโอเจลบริสุทธิ์อยู่ที่ 0.7125 ตารางเมตรต่อกรัม ในขณะที่ แอรโอเจลที่ผสมสังกะสีประจุศูนย์ซัลไฟด์มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะลดลงเหลือ 0.4996 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับค่าความพรุนที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XTM

ดังนั้นผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงแอรโอเจลด้วยสังกะสีประจุศูนย์ที่เติมซัลไฟด์ ส่งผลต่อโครงสร้างและสมบัติทางกายภาพของแอรโอเจลโดยเฉพาะในด้านความพรุนและพื้นที่

ผิวจำเพาะ ข้อมูลดังกล่าวมีความสำคัญต่อการนำแอรเจลไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับสำหรับการกำจัดสารมลพิษ เช่น เมโรมิล ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียในขั้นตอนถัดไป

5.1.2 การศึกษาการบำบัดสารเมโรมิล

การศึกษานี้มุ่งเน้นการสังเคราะห์วัสดุดูดซับแอรเจลและแอรเจลที่ผสมสังกะสีประจุศูนย์ซัลไฟด์ เพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุสำหรับกำจัดสารเมโรมิลร่วมกับสารเปอร์ซัลเฟต โดยพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด ได้แก่ 1) ชนิดของแอรเจล 2) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเปอร์ซัลเฟต 3) ระยะเวลาสัมผัส 4) ความเร็วรอบในการกวน และ 5) ค่าความเป็นกรดต่าง การทดลองดำเนินการโดยตรวจวัดความเข้มข้นของสารเมโรมิลด้วยเทคนิค HPLC ซึ่งช่วยให้สามารถวิเคราะห์ความเข้มข้นได้อย่างแม่นยำและศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารเมโรมิลเปรียบเทียบกับเวลาได้ผลสรุปดังต่อไปนี้

1) ในการศึกษาผลของชนิดของแอรเจลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารเมโรมิล ได้ทำการทดลองภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด โดยใช้ความเข้มข้นของสารเมโรมิลเริ่มต้นที่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟตที่ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการกวนสารละลายด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาที และเก็บตัวอย่างที่ช่วงเวลาต่าง ๆ ตั้งแต่ 0 ถึง 120 นาที วัสดุดูดซับที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีทั้งหมด 3 ชนิด และจากผลการทดลองพบว่า แอรเจลที่ผ่านการปรับปรุงด้วยซัลไฟด์มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมโรมิลสูงสุด โดยสามารถกำจัดได้ถึงร้อยละ 53.3 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่มากกว่าวัสดุดูดซับชนิดอื่น ๆ ผลลัพธ์ดังกล่าวอาจเกิดจากสมบัติทางเคมีและกายภาพของวัสดุที่ได้รับการปรับปรุงทำให้สามารถเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของเปอร์ซัลเฟตและเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารมลพิษได้สูงขึ้น ดังนั้น แอรเจลที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์จึงเป็นวัสดุดูดซับที่มีศักยภาพสูงสำหรับการกำจัดสารเมโรมิล

2) ในการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเปอร์ซัลเฟตต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารเมโรมิล ได้ดำเนินการทดลองภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด โดยใช้ความเข้มข้นของสารเมโรมิลเริ่มต้นที่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟตที่ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการกวนสารละลายที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที และเก็บตัวอย่างที่ช่วงเวลาต่าง ๆ ได้แก่ 0 5 10 20 30 60 90 และ 120 นาที เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของสารเมโรมิล ผลการทดลองพบว่า แอรเจลที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์มีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดสารเมโรมิลที่ร้อยละ 53.1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแม้ว่าการเพิ่มความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตจะช่วยเพิ่มอัตราการทำลายเมโรมิลได้อย่างรวดเร็วในช่วงแรกของปฏิกิริยา แต่เมื่อความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตสูงขึ้น อาจเกิดผลกระทบจากการจับตัวกันของอนุภาคนิวคลีอัสซัลเฟต ทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมลดลงเมื่อเทียบกับเงื่อนไขที่ใช้เปอร์ซัลเฟตในปริมาณที่เหมาะสม ดังนั้น การเลือกใช้ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตที่เหมาะสมจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงถึง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมโรมิลโดยไม่ก่อให้เกิดผลกระทบเชิงลบต่อกระบวนการกำจัด

3) การศึกษาผลของระยะเวลาในการสัมผัสต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารเมโรมิล ได้ดำเนินการทดลองโดยใช้ความเข้มข้นของสารเมโรมิลเริ่มต้นที่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้น

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

4) การศึกษาผลของความเร็วยรอบในการกวนต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารเมไธมิลดำเนินการภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารเมไธมิลเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และสารเปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทำการเก็บตัวอย่างตามช่วงเวลา 0 ถึง 360 นาที ผลการทดลอง พบว่าความเร็วยรอบในการกวนส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการกำจัดและการกระจายตัวของสารเปอร์ซัลเฟตในสารละลาย โดยเมื่อเพิ่มความเร็วยรอบในการกวนจะช่วยให้เกิดการสัมผัสระหว่างแอร์เจลและสารละลายมากขึ้น ส่งผลให้กระบวนการกำจัดและการออกซิเดชันมีประสิทธิภาพสูงขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อความเร็วยรอบสูงเกินไปอาจทำให้เกิดแรงเฉือนที่รบกวนการเกาะติดของสารมลพิษบนพื้นผิวของแอร์เจลและลดประสิทธิภาพโดยรวม ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าที่ความเร็วยรอบ 200 รอบต่อนาที ประสิทธิภาพของแอร์เจลที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ในการกำจัดสารเมไธมิลมีค่าสูงสุด ดังนั้นจึงเลือกใช้ความเร็วยรอบ 200 รอบต่อนาทีเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดสารเมไธมิลในงานวิจัยนี้

5) การศึกษาผลของค่าความเป็นกรดต่างต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารเมไธมิลดำเนินการภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารเมไธมิลเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และสารเปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเก็บตัวอย่างตามช่วงเวลา 0 ถึง 360 นาที ผลการทดลองพบว่าค่าความเป็นกรดต่างมีบทบาทสำคัญต่อกลไกการกำจัดเนื่องจากมีผลต่อกระบวนการออกซิเดชันของเปอร์ซัลเฟตและการแตกตัวของสารเมไธมิลในสารละลาย จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพของวัสดุดูดซับแอร์เจลที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์มีค่าสูงสุดที่ pH 9 โดยที่สภาวะนี้ส่งผลต่อการเกิดอนุมูลอิสระซัลเฟตและอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลซึ่งเป็นตัวกลางสำคัญในการทำลายโครงสร้างของสารเมไธมิล ดังนั้นในการศึกษานี้จึงเลือกใช้ค่าความเป็นกรดต่างที่ 9 เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการกำจัดสารเมไธมิลร่วมกับเปอร์ซัลเฟต

6) การศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการกำจัดสารเมไธมิลโดยใช้แอร์เจลที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ร่วมกับสารเปอร์ซัลเฟตโดยพิจารณาปัจจัยความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟต ทั้งนี้เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม และแบบอันดับสองเทียม ผลการศึกษา พบว่าข้อมูลการทดลองสามารถอธิบายได้ดีด้วยแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม เนื่องจากค่า (R^2) มีค่าใกล้เคียง 1 มากกว่าแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ซึ่งบ่งชี้ว่ากลไกหลักของกระบวนการกำจัดสารเมไธมิลเกิดขึ้นโดยกระบวนการดูดซับที่ขึ้นกับความเข้มข้นของสารเมไธมิลในสารละลายเป็นหลัก ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า การกำจัดสารเมไธมิล

ในระบบที่ใช้แอร์เจลที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์ร่วมกับสารเปอร์ซัลเฟตสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม

5.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะสำหรับการนำไปต่อยอดและการนำไปใช้งานมีดังต่อไปนี้

5.2.1 ผลการศึกษาด้วยเทคนิค XTM แสดงให้เห็นว่าการเติมสารเนฟทาลีนในเซลล์โอส แอร์เจลส่งผลต่อค่าความพรุนของวัสดุ ดังนั้นควรมีการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับอัตราการเติมเนฟทาลีนระหว่างกระบวนการสังเคราะห์เพิ่มเติม เพื่อให้เข้าใจถึงกลไกและผลกระทบที่เกิดขึ้นอย่างเป็นระบบ

5.2.2 จากกระบวนการสังเคราะห์แอร์เจล ควรมีการเพิ่มสัดส่วนในการสังเคราะห์ ได้แก่ สัดส่วนของเซลล์โอส สัดส่วนของสารเชื่อมพันธะ และปัจจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ เพื่อที่จะให้ได้คุณลักษณะของแอร์เจลที่ดีที่สุด

5.2.3 จากกระบวนการสังเคราะห์แอร์เจล ลักษณะของรูพรongและความหนาของแอร์เจล ควรมีการศึกษาเพิ่มเติม

5.2.4 จากกระบวนการสังเคราะห์แอร์เจล โดยมีการเติมสารเชื่อมพันธะเพียงชนิดเดียว ควรมีการศึกษารุ่นอื่น ๆ เพิ่มเติม เพื่อเพิ่มศักยภาพให้แอร์เจลมีความแข็งแรงมากขึ้นกว่าเดิม

5.2.5 จากกระบวนการปรับสภาพวัสดุเหลือทางการเกษตร ควรมีการนำวัสดุเหลือทิ้งชนิดอื่น ๆ มาทำการศึกษาเพิ่มขึ้น เช่น เปลือกข้าวโพด ฟางข้าว ผักตบชวา หญ้าเนเปียร์ เป็นต้น

5.2.6 จากกระบวนการปรับสภาพ ควรเลือกวิธีการที่สามารถทำให้เป็นนาโนเซลล์โอส เพื่อที่จะนำไปใช้ในขั้นตอนการสังเคราะห์แอร์เจลให้มีคุณลักษณะสมบัติที่ดีกว่าเดิม

5.2.7 จากการศึกษาการกำจัดสารเมโรมิลด้วยแอร์เจลผสมสังกะสีประจุศูนย์ซัลไฟด์ ควรศึกษาในสภาวะไร้ออกซิเจนเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารเมโรมิลเพิ่มขึ้น

5.2.8 จากการศึกษาการกำจัดสารเมโรมิลเพียงอย่างเดียว ควรมีการศึกษารุ่นกำจัดศัตรูพืชหรือวัชพืชชนิดอื่น ๆ เพิ่มเติมด้วยเพื่อนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสารต่าง ๆ

รายการอ้างอิง

- มหาราชมงคล, ก. (2558). การปรับสภาพพื้นผิวของเส้นใยเซลลูโลสจากฟางข้าวด้วยไฮเลนเพื่อใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในเรซินอีพ็อกซี (วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต).
- สำนักโรคจากการประกอบอาชีพและสิ่งแวดล้อม (2556). องค์ความรู้ด้านการก่ออันตรายของสารกำจัดศัตรูพืชที่ต้องเฝ้าระวัง.
- สำนักควบคุมพืชและวัสดุการเกษตร กรมวิชาการเกษตร (2566). รายละเอียดการนำเข้าวัตถุดิบอันตรายทางการเกษตร ปี พ.ศ. 2560-2566.
- สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย (2566). รายงานสถานการณ์การเพาะปลูกอ้อย ปีการผลิต 2565/66. กลุ่มเทคโนโลยีสารสนเทศ กองยุทธศาสตร์และแผนงาน
- อนุสรณ์ แก้วการ (2562). การสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรด้วยสารสกัดใบยูคาลิปตัส และคลื่นอัลตราโซนิกสำหรับการบำบัดสารไกลโฟเซตในดิน โดยใช้ปฏิกิริยาเสมือนเฟ้นต้น.
- Acerio, J. L., Benítez, F. J., Real, F. J., & Rodríguez, E. (2018). Degradation of selected emerging contaminants by UV-activated persulfate: Kinetics and influence of matrix constituents. *Separation and Purification Technology*, 201, 41–50.
- Aegerter, M.A.; Leventis, N.; Koebel, M.M. *Aerogels Handbook*; Springer: New York, NY, USA, 2011.
- Ahmad, H. B., Abbas, Y., Hussain, M., Akhtar, N., Ansari, T. M., Zuber, M., Zia, K. M., & Arain, S. A. (2014). Synthesis and application of alumina supported nano zero valent zinc as adsorbent for the removal of arsenic and nitrate. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 31(2), 284-288. <https://doi.org/10.1007/s11814-013-0219-0>
- ElKhatat, A.M., & Al-Muhtaseb, S.A. (2011). Advances in tailoring resorcinol-formaldehyde organic and carbon gels. *Advanced Materials*, 23(26), 2887–2903.
- Anirudhan T, Deepa J (2017) Nano-zinc oxide incorporated graphene oxide/nano cellulose composite for the adsorption and photocatalytic degradation of ciprofloxacin hydrochloride from aqueous solutions. *Colloid Interface Sci* 490:343–356.
- Bian Y, He B, Li J. Preparation of cellulosebased fluorescent materials using Zinc sulphide quantum dot-decorated graphene by a one-step hydrothermal method. *Cellulose*. 2016 Aug;23:2363-73.
- Cong, L., Guo, J., Liu, J., Shi, H., & Wang, M. (2015). Rapid degradation of endosulfan by zero-valent zinc in water and soil. *Journal of Environmental Management*, 150, 451–455. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.12.028>

- Chang, C. F., & Lee, S. C. (2012). Adsorption behavior of pesticide methomyl on activated carbon in a high gravity rotating packed bed reactor. *Water Research*, 46(10), 2869–2876. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.02.041>
- Cheng, H., Gu, B., Pennefather, M. P., Nguyen, T. X., Phan-Thien, N., & Duong, H. M. (2017). Cotton aerogels and cotton-cellulose aerogels from environmental waste for oil spillage cleanup. *Materials & Design*, 130, 452–458. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2017.05.082>
- Choi, J.-H., & Kim, Y.-H. (2009). Reduction of 2,4,6-trichlorophenol with zero-valent zinc and catalyzed zinc. *Journal of Hazardous Materials*, 166(2–3), 984–991. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.12.004>
- Dai, Y., Zhang, T., Jing, Z., Li, Z., Zhu, Y., Qiu, F., Pan, J., & Li, C. (2022). Efficient cellulose aerogel biosorbents functionalized by nanosized zero-valent iron: Isotherms, kinetics, thermodynamics and mechanism of tellurium adsorption. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 651, 129765. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.129765>
- Dilamian, M., & Noroozi, B. (2021). Rice straw agri-waste for water pollutant adsorption: Relevant mesoporous super hydrophobic cellulose aerogel. *Carbohydrate Polymers*, 251, 117016. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117016>
- Dong, H., Wang, B., Li, L., Wang, Y., Ning, Q., Tian, R., Li, R., Chen, J., & Xie, Q. (2019). Activation of persulfate and hydrogen peroxide by using sulfide-modified nanoscale zero-valent iron for oxidative degradation of sulfamethazine: A comparative study. *Separation and Purification Technology*, 218, 113–119. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.02.052>
- Dong, H., Zhang, C., Deng, J., Jiang, Z., Zhang, L., Cheng, Y., et al., 2018. Factors influencing degradation of trichloroethylene by sulfide-modified nanoscale zero-valent iron in aqueous solution. *Water Res.* 135, 1–10.
- Dong, N., Qin, Z., Li, W., Xiang, N., Luo, X., Ji, H., Wang, Z., & Xie, X. (2023). Temperature-Sensitive Aerogel Using Bagasse Carboxylated Cellulose Nanocrystals/N-Isopropyl Acrylamide for Controlled Release of Pesticides. *Polymers*, 15(22), 4451. <https://doi.org/10.3390/polym15224451>
- Ebrahimi, A., Dahrzma, B., & Adelifard, M. (2020). Facile and novel ambient pressure drying approach to synthesis and physical characterization of cellulose-based aerogels. *Journal of Porous Materials*, 27(4), 1219–1232. doi:10.1007/s10934-020-00901-4
- Ecobichon DJ. Pesticide use in developing countries. *Toxicology*. 2001 Mar 7;160(1-3):27-33. doi: 10.1016/s0300-483x(00)00452-2. PMID: 11246121.

- El-Geundi, M. S., Nassar, M. M., Farrag, T. E., & Ahmed, M. H. (2013). Methomyl adsorption onto cotton stalks activated carbon (CSAC): Equilibrium and process design. *Procedia Environmental Sciences*, 17, 630–639. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.02.079>
- Fan, C., & Liao, M.-C. (2009). The mechanistic and oxidative study of methomyl and parathion degradation by Fenton process. *International Journal of Chemical and Molecular Engineering*, 3(11), International Scholarly and Scientific Research & Innovation, 3(11).
- Furman, O. S., Teel, A. L., & Watts, R. J. (2010). Mechanism of base activation of persulfate. *Environmental Science & Technology*, 44(16),6426428.<https://doi.org/10.1021/es101096q>
- Ghauch, A., 2008. Rapid removal of flutriafol in water by zero-valent iron powder. *Chemosphere* 71, 816-826.
- Guo, J., Zhu, L., Sun, N., & Lan, Y. (2017). Degradation of nitrobenzene by sodium persulfate activated with zero-valent zinc in the presence of low frequency ultrasound. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 000, 1–7.
- Guo, Q., Li, M., Tian, L., & Zhang, Y. (2022). Enhanced adsorption and structure regulation of modified cellulose aerogels via metal nanoparticle incorporation. *Journal of Hazardous Materials*, 424, 127332. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127332>
- Hamitouche, A., Haffas, M., Boudjemaa, A., Benammar, S., Sehailia, M., & Bachari, K. (2017). Efficient biosorption of methylene blue, malachite green and methyl violet organic pollutants on biomass derived from *Anethum graveolens*: An eco-benign approach for wastewater treatment. *Desalination and Water Treatment*, 89, 250–260. <https://doi.org/10.5004/dwt.2017.20615>
- Hao, N. T., Nguyen, H., Nguyen, L., Do, K. N., & Vu, L. D. (2020). Efficient removal of ciprofloxacin in aqueous solutions by zero-valent metal-activated persulfate oxidation: A comparative study. *Journal of Water Process Engineering*, 35, 101199.
- Hayat, W., Zhang, Y., Huang, S., Hussain, I., & Huang, R. (2021). Insight into the degradation of methomyl in water by peroxymonosulfate. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(3), 105358. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105358>.
- Hayat, W., Zhang, Y., Liu, Z., & Du, X. (2023). Comparison of the efficiencies of pyrite and zero-valent iron activated peroxydisulfate systems to degrade methomyl in water. *Separation and Purification Technology*, 306, 122619. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122619>

- Ji, Y., Wen, Y., Wang, Z., Zhang, S., Guo, M., 2020. Eco-friendly fabrication of a cost effective cellulose nanofiber-based aerogel for multifunctional applications in Cu (II) and organic pollutants removal. *J. Clean. Prod.* 255, 120276.
- Keshavarz, L., Ghaani, M. R., MacElroy, J. D. M., & English, N. J. (2021). A comprehensive review on the application of aerogels in CO₂-adsorption: Materials and characterisation. *Chemical Engineering Journal*, 412, 128604. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.128604>
- Khani , Ali, Taherkhani, & Samira. (2019). Preparation of Nanosized Zero-Valent zinc (Zn⁰) Immobilized on ZnO as Redox Nanocomposite for Degradation of Methyl Orange from Aqueous Solution. *Journal of Environmental Health and Sustainable Development*. doi:10.18502/jehsd.v4i1.486
- Kistler, S. S. (1931). Coherent expanded aerogels and jellies. *Nature*, 127, 3211.
- Kuhr RJ, Dorough HW (1976) Carbamate insecticides: chemistry, biochemistry and toxicology. CRC Press, Boca Raton
- Li, H., Guo, J., Yang, L., & Lan, Y. (2014). Degradation of methyl orange by sodium persulfate activated with zero-valent zinc. *Separation and Purification Technology*, 132, 168–173. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.05.015>
- Li, J., Tan, S., Xu, Z., 2020. Anisotropic nanocellulose aerogel loaded with modified UiO-66 as efficient adsorbent for heavy metal ions removal. *Nanomaterials* 10 (6),1114.
- Liang, C., & Su, H.-W. (2009). Identification of sulfate and hydroxyl radicals in thermally activated persulfate. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48(11), 5558–5562. <https://doi.org/10.1021/ie9002848>
- Lin, Z., Zhang, W., Pang, S., Huang, Y., Mishra, S., Bhatt, P., & Chen, S. (2020). Current approaches to and future perspectives on methomyl degradation in contaminated soil/water environments. *Molecules*, 25(3), 738. <https://doi.org/10.3390/molecules25030738>
- M. Tamimi, S. Qourzal, A. Assabbane, J.M. Chovelon, C. Ferronato, Y. Ait-Ichou, Photocatalytic degradation of pesticide methomyl: determination of the reaction pathway and identification of intermediate products, *Photochem. Photobiol. Sci.* 5 (2006) 477–482.
- M. Tamimi, S. Qourzal, N. Barka, A. Assabbane, Y. Ait-Ichou, Methomyl degradation in aqueous solutions by Fenton's reagent and the photo-Fenton system, *Sep. Purif. Technol.* 61 (2008) 103–108.

- Maduang, T., Chunchart, O., and Pawongrat, R. (2018). The Effect on Morphological Change of Cellulose Fibers by Sonochemical-Assisted Pretreatment of Lignocellulosic Biomass. *RMUTSB Academic Journal*. Vol. 6, No. 1, pp. 26-36
- Malato S, Blanco J, Caceres J, Fernandez-Alba AR, Aguera A, Rodriguez A (2002) Photocatalytic treatment of water-soluble pesticides by photo-Fenton and TiO₂ using solar energy. *Catal Today* 76:209–220
- Maleki, H. Durães, L. Portugal, A. (2014) An overview on silica aerogels synthesis and different mechanical reinforcing strategies. *J. Non-Cryst. Solids* 385, 55
- Maleki, H., Durães, L., García-González, C. A., del Gaudio, P., Portugal, A., & Mahmoudi, M. (2016). Synthesis and biomedical applications of aerogels: Possibilities and challenges. *Advances in Colloid and Interface Science*. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2016.05.011>
- Misra, R., Satyanarayan, S., & Potle, N. (2013). Treatment of agrochemical/pesticide wastewater by coagulation/flocculation process. *International Journal of Chemical and Physical Sciences*, 2(Special Issue), March. ISSN: 2319-6602.
- McNaught, A.D.; Wilkinson, A. *Compendium of Chemical Terminology*; Blackwell Science Oxford: Cambridge, UK, 1997.
- Melesse, G. T., Hone, F. G., & Mekonnen, M. A. (2022). Extraction of cellulose from sugarcane bagasse: Optimization and characterization. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022, 1712207. <https://doi.org/10.1155/2022/1712207>
- Miles CJ, Oshiro WC (1990) Degradation of methomyl in chlorinated water. *Environ Toxicol Chem* 9:535–540
- Monteagudo, A. Durán, R. González, A.J. Expósito, In situ chemical oxidation of carbamazepine solutions using persulfate simultaneously activated by heat energy, UV light, Fe²⁺ ions, and H₂O₂, *Appl. Catal. B Environ.* 176–177 (2015) 120–129, <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2015.03.055>.
- Nguyen, S. T., Feng, J., Ngadiman, N. H. A., Le, T. T. H., Huynh, T. T. D., & Nguyen, T. P. (2021). Cellulose aerogels: a review of preparation and applications. *Cellulose*, 28(5), 2649–2695. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-03684-w>
- Paulauskiene, T., Uebe, J., Karasu, A.U., Anne, O., 2020. Investigation of cellulose-based aerogels for oil spill removal. *Water, Air, Soil Pollut.* 231 (8), 1–10.
- Parale, V.G. Han, W. Lee, K.-Y. Park, H.-H. (2018) Ambient pressure dried tetrapropoxysilane-based silica aerogels with high specific surface area. *Solid State Sci.* 75,63.bra

- Poletto, M., Pistor, V., & Zattera, A. J. (2012). Structural characteristics and thermal properties of native cellulose. *Cellulose - Fundamental Aspects*, InTech. <https://doi.org/10.5772/50720>
- Pourrezaei, P., Alpatova, A., Khosravi, K., Drzewicz, P., Chen, Y., Chelme-Ayala, P., Gamal El-Din, M., 2014. Removal of organic compounds and trace metals from oil sands process-affected water using zero valent iron enhanced by petroleum coke. *J. Environ. Manage.* 139, 50-58.
- Qiong Bin, Bin Lin, Ke Zhu, Yaqian Shen, Yuanyuan Man, Boyang Wang, Wenjin Chen. (2020). Superior trichloroethylene removal from water by sulfide-modified nanoscale zero-valent iron/graphene aerogel composite. *journal of environmental sciences* 90-102.
- Quoc Ba Thia, Son Truong Nguyenb, Duong Khanh Hob, Tuan Du Tranb, Dat Minh Huynhb, Nga H.N. Dob, Duong, H. M. (2020). Cellulose-based aerogels from sugarcane bagasse for oil spill-cleaning and heat insulation applications. *Carbohydrate Polymers*.
- Rafieian, F., Dufresne, A., Askari, G., Rezaei, A., Seyedhosseini-Ghaheh, H., & Jafari, S. M. (2024). Aerogels as novel ingredients: Production, properties and applications in medical, food and environmental sectors. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 687, 133410. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.133410>
- Rahmani AR, Rezaeivahidian H, Almasi M, Shabanlo A, Almasi H (2016) A comparative study on the removal of phenol from aqueous solutions by electro-Fenton and electro persulfate processes using iron electrodes. *Res Chem Intermed* 42(2):1441–1450.
- Rahmani, A. R., Rezaei-Vahidian, H., Almasi, H., & Donyagard, F. (2017). Modeling and optimization of ciprofloxacin degradation by hybridized potassium persulfate/zero valent-zinc/ultrasonic process. *Environmental Processes*, 4(3), 563–572.
- Ranjith KS, Senthamizhan A, Balusamy B, Uyar T. Nanograined surface shell wall controlled ZnO–ZnS core–shell nanofibers and their shell wall thickness dependent visible photocatalytic properties. *Catalysis Science & Technology*. 2017;7(5):1167-80.
- Rocha, G. J. M., Martin, C., Soares, I. B., Maior, A. N. S., Baudel, H. M., & Abreu, C. A. M. (2011). Dilute mixed-acid pretreatment of sugarcane bagasse for ethanol production. *Biomass and Bioenergy*, 35(2), 663–670. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.10.021>

- Salter-Blanc, A. J., & Tratnyek, P. G. (2011). Effects of solution chemistry on the dechlorination of 1,2,3-trichloropropane by zero-valent zinc. *Environmental Science & Technology*, 45(9), 4073–4079. <https://doi.org/10.1021/es104081p>
- S. Raut-Jadhav, D.V. Pinjari, D.R. Saini, S.H. Sonawane, A.B. Pandit, Intensification of degradation of methomyl (carbamate group pesticide) by using the combination of ultrasonic cavitation and process intensifying additives, *Ultrason. Sonochem.* 31 (2016) 135–142.
- Shah, N. S., Imran, M., Khan, J. A., Sayed, M., Khan, Z. U. H., Iqbal, J., Murtaza, B., Zakir, A. and Polychronopoulou, K. (2019) 'Nano zerovalent zinc catalyzed peroxymonosulfate-based advanced oxidation technologies for treatment of chlorpyrifos in aqueous solution: A semi-pilot scale study', *Journal of Cleaner Production*, 241, p. 119032.
- Stergar, J., & Maver, U. (2016). Review of aerogel-based materials in biomedical applications. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s10971-016-3968-5>
- Syeda, P.-S. Yap, A review on three-dimensional cellulose-based aerogels for the removal of heavy metals from water, *Sci. Total Environ.* 807 (2022), 150606.
- Tamimi M, Qourzal S, Assabbane A, Chovelon J-M, Ferronatob C, Ait-Ichoua Y (2006) Photocatalytic degradation of pesticide methomyl: determination of the reaction pathway and identification of intermediate products. *Photochem Photobiol Sci* 5:477–482
- Taherkhani, S., & Khani, A. (2019). Preparation of nanosized zero-valent zinc (Zn^0) immobilized on ZnO as redox nanocomposite for degradation of methyl orange from aqueous solution. *Journal of Environmental Health and Sustainable Development*, 4(1), 694-700.
- Theamdee, P., Chawpaina, P., & Polthana, S. (2023). The preparation of pH indicator paper from bagasse fiber with anthocyanin extract from butterfly pea flower, purple cabbage, and *Ixora coccinea* for an acid-base soil monitoring application. *RMUTI Journal Science and Technology*, 16(1).
- Toivonen, M. S., Kaskela, A., Rojas, O. J., Kauppinen, E. I., & Ikkala, O. (2015). Ambient-dried cellulose nanofibril aerogel membranes with high tensile strength and their use for aerosol collection and templates for transparent, flexible devices. *Advanced Functional Materials*, 25(43), 6618–6626.
- Urán-Duque, L., Saldarriaga-Molina, J. C., & Rubio-Clemente, A. (2021). Advanced oxidation processes based on sulfate radicals for wastewater treatment: Research trends. *Water*, 13(17), 2445. <https://doi.org/10.3390/w13172445>

- Van Scoy, A. R., Yue, M., Deng, X., & Tjeerdema, R. S. (2013). Environmental fate and toxicology of methomyl. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 222, 93–109. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4717-7_4
- Vievard, J., Alem, A., Pantet, A., Ahfir, N. D., Arellano-Sánchez, M. G., Devouge-Boyer, C., & Mignot, M. (2023). Bio-based adsorption as ecofriendly method for wastewater decontamination: A review. *Toxics*, 11(5), 404. <https://doi.org/10.3390/toxics11050404>
- Wen G, Wang S-J, Ma J, Huang T-L, Liu Z-Q, Zhao L, Su J-F (2014). Enhanced ozonation degradation of di-nbutyl phthalate by zero-valent zinc in aqueous solution: performance and mechanism. *J Hazard Mater* 265:69–78.
- WHO. 1976. Evaluations of Some Pesticide Residues in Food. WHO Pesticide Residues Series, No.5. Geneva. p. 289–312.
- World Health Organization (WHO). (2019). The WHO recommended classification of pesticides by hazard and guidelines to classification 2019. World Health Organization. [Online] Available from: <https://www.who.int/publications/item/9789240005662>
- Wu, N., Yang, Y., Wang, C., Wu, Q., Pan, F., Zhang, R., Liu, J., & Zeng, Z. (2023). Ultrathin cellulose nanofiber assisted ambient-pressure-dried, ultralight, mechanically robust, multifunctional MXene aerogels. *Advanced Materials*, 35(2207969).
- Xie, X., Zhang, Y., Huang, W., & Huang, S. (2012). Degradation kinetics and mechanism of aniline by heat-assisted persulfate oxidation. *Journal of Environmental Sciences*, 24(5), 821–826.
- Xu, X. et al. (2015). An improved X-ray diffraction method for cellulose crystallinity measurement. *Carbohydrate Polymers*, 123, PNNL-SA-108288.
- Yang, W.Z., 1982. *Electrochemical Basis*. Peking University Press, Beijing, China, pp.284, pp. 173.
- Ying Li, Hui Li, Jing Zhang, Guixiang Quan, & Yeqing Lan. (2014). Efficient Degradation of Congo Red by Sodium Persulfate Activated with Zero-Valent Zinc. *Water, Air, & Soil Pollution*, 225(2121). <https://doi.org/10.1007/s11270-014-2121-8>
- Yuan, Y., Tao, H., Fan, J., & Ma, L. (2015). Degradation of p-chloroaniline by persulfate activated with ferrous sulfide ore particles. *Chemical Engineering Journal*, 268, 38–46. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.12.092>
- Yu Liu, Q. Xiong, H. Song, Y. Peng, L. Liu, C. Jiang, Preparation of LDH-modified cotton fabric based carbon aerogel as a highly efficient adsorbent for tellurium recovery, *Cellulose* 26 (2019) 2573–2585.

- Zhang, C., Xu, Y., Chu, B., & Sun, X. (2024). Mechanism and toxicity assessment of carbofuran degradation by persulfate-based advanced oxidation process. *RSC Advances*, 14(45), 30582–30589. <https://doi.org/10.1039/D4RA05365F>
- Zhang, D., Li, Y., Tong, S., Jiang, X., Wang, L., Sun, X., et al., 2018. Biochar supported sulfide-modified nanoscale zero-valent iron for the reduction of nitrobenzene. *RSC Adv.* 8 (39),22161–22168.
- Zhang L, Dong R, Zhu Z, Wang S. Au nanoparticles decorated ZnS hollow spheres for highly improved gas sensor performances. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2017 Jun 1;245:112-21.
- Zhang, S., Wang, Z., Hu, Y., Ji, H., Xiao, Y., Wang, J., Xu, G., & Ding, F. (2022). Ambient pressure drying to construct cellulose acetate/benzoxazine hybrid aerogels with flame retardancy, excellent thermal stability, and superior mechanical strength resistance to cryogenic temperature. *Biomacromolecules*, 23(12), 5056–5064.
- Zhangdi Li, T. Zhang, F. Qiu, X. Yue, D. Yang, P. Li, Y. Zhu, Facile fabrication of bifunctional ZIF-L/cellulose composite membrane for efficient removal of tellurium and antibacterial effects, *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* 95 (2019) 515–524.
- Zhang, Y., Zhao, Y., & Ma, Q. (2018). Structure–property relationship of cellulose aerogels prepared from different solvents. *Carbohydrate Polymers*, 183, 232–240. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.12.066>



ภาคผนวก ก
ผลการบำบัดสารเมโทมิล

ตารางที่ ก.1 ผลของการศึกษาชนิดของแอโรเจลในการบำบัดสารเมโรมิลร่วมกับสารเปอร์ซัลเฟต

Time	PS Only		PS +Aerogel		PS + Sulfide-modified zero-valent zinc aerogel		PS + Sulfide-modified aerogel		Aerogel Only	
	Con.	Ct/C0	Con.	Ct/C0	Con.	Ct/C0	Con.	Ct/C0	Con.	Ct/C0
0	4.850	1.000	4.673	1.000	4.929	1.000	5.057	1.000	5.541	1.000
5	4.137	0.853	3.709	0.794	4.047	0.821	4.819	0.953	4.253	0.767
10	3.980	0.821	3.511	0.751	3.952	0.802	4.596	0.909	4.124	0.744
20	3.896	0.803	3.379	0.723	3.831	0.777	4.374	0.865	4.070	0.734
30	3.676	0.758	2.917	0.624	3.075	0.624	3.859	0.763	3.900	0.704
60	3.377	0.696	2.751	0.589	2.899	0.588	3.302	0.653	4.070	0.734
90	3.250	0.670	2.615	0.560	2.744	0.557	2.804	0.554	4.368	0.788
120	2.869	0.592	2.494	0.534	2.538	0.515	2.360	0.467	4.409	0.796

ตารางที่ ก.2 ผลของการศึกษาความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟตในการบำบัดสารเมโรมิลร่วมกับสารเปอร์ซัลเฟต

Time	PS 200 mg/L		PS 400 mg/L		PS 500 mg/L		PS 600 mg/L	
	Con.	Ct/C0	Con.	Ct/C0	Con.	Ct/C0	Con.	Ct/C0
0	4.670	1.000	4.880	1.000	4.642	1.000	4.948	1.000
5	3.974	0.852	4.846	0.994	4.385	0.945	4.743	0.962
10	3.865	0.828	4.713	0.966	4.301	0.927	4.586	0.930
20	3.912	0.838	4.340	0.891	4.106	0.885	4.560	0.923
30	4.121	0.883	4.173	0.858	3.912	0.842	4.143	0.839
60	4.059	0.870	3.109	0.641	3.664	0.789	3.674	0.744
90	4.044	0.867	2.651	0.544	3.222	0.693	3.052	0.617
120	3.963	0.850	2.277	0.469	2.895	0.623	2.803	0.566

ตารางที่ ก.3 ผลของการศึกษาระยะเวลาในการสัมผัสในการบำบัดสารเมโรไมลร่วมกับสารเปอร์ซัลเฟต

เวลา (นาที)	สารเมโรไมล	
	Con.	Ct/C0
0	4.834	1.000
5	4.681	0.973
10	4.642	0.964
20	4.400	0.918
30	4.222	0.881
60	3.762	0.787
90	3.691	0.772
120	3.457	0.723
180	3.051	0.639
240	2.720	0.570
300	2.415	0.506
360	2.229	0.463
1440	1.954	0.407

ตารางที่ ก.4 ผลของการศึกษาความเร็วรอบในการกวนในการบำบัดสารเมธิลร่วมกับสารเปอร์ซัลเฟต

เวลา (นาที)	100 รอบต่อนาที		150 รอบต่อนาที		200 รอบต่อนาที		250 รอบต่อนาที	
	Con.	Ct/C0	Con.	Ct/C0	Con.	Ct/C0	Con.	Ct/C0
0	4.710	1.000	4.965	1.000	5.019	1.000	4.972	1.000
5	4.033	0.857	4.688	0.945	4.562	0.910	4.873	0.981
10	3.839	0.832	4.472	0.900	4.073	0.812	4.011	0.807
20	3.914	0.818	3.731	0.752	3.517	0.701	4.057	0.816
30	3.571	0.759	3.460	0.697	3.165	0.630	4.195	0.843
60	3.304	0.703	3.217	0.648	2.848	0.567	3.357	0.675
90	2.835	0.603	3.117	0.628	2.375	0.473	2.913	0.586
120	2.462	0.523	2.784	0.561	2.191	0.438	2.931	0.589
180	2.278	0.485	2.788	0.562	2.103	0.420	2.558	0.515
240	2.067	0.440	2.326	0.470	1.835	0.367	2.220	0.447
300	1.997	0.425	2.403	0.484	1.699	0.339	2.003	0.404
360	2.018	0.429	2.261	0.456	1.744	0.349	1.787	0.360

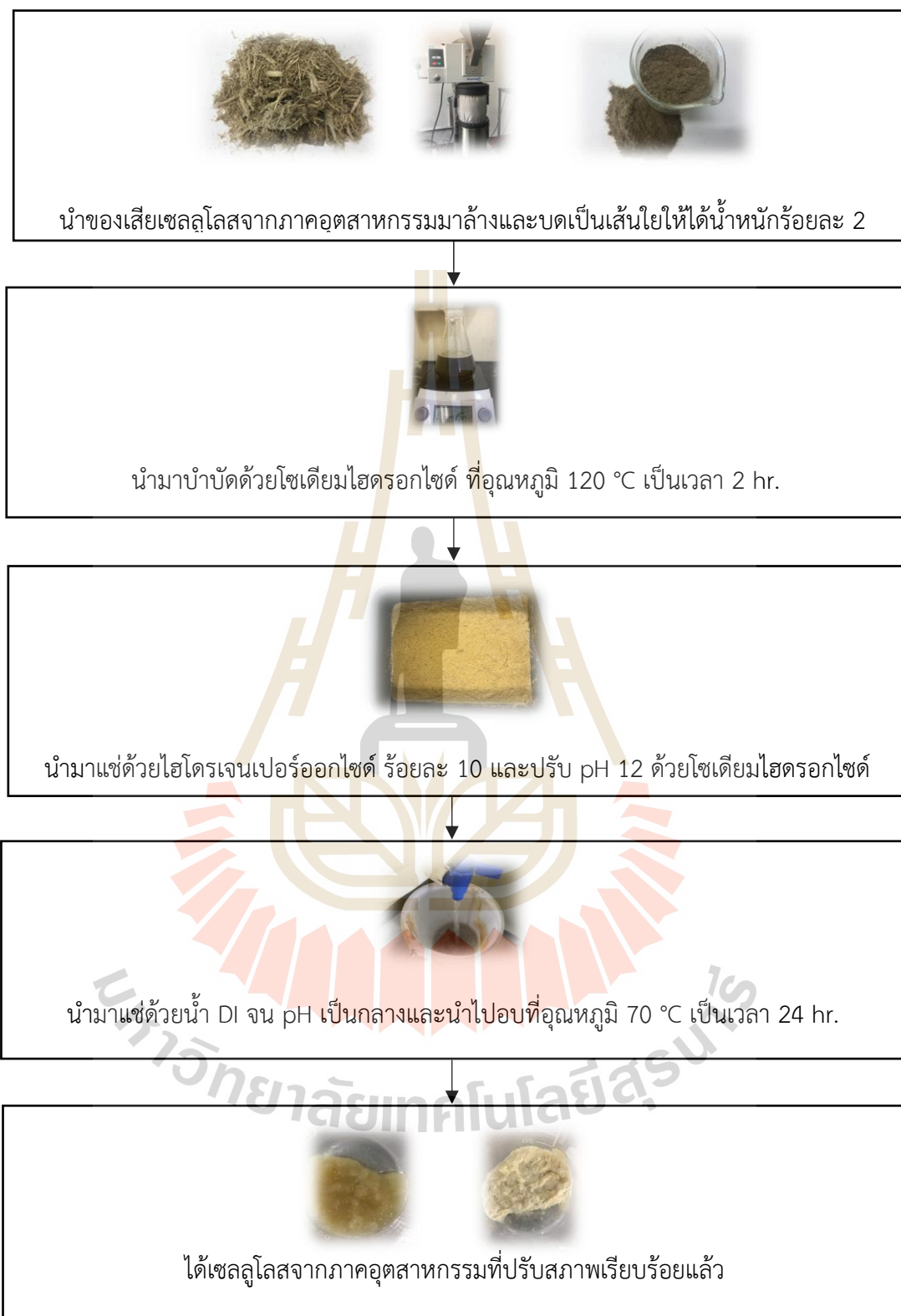
ตารางที่ ก.5 ผลของการศึกษาค่าความเป็นกรดต่างในการบำบัดสารเมโรมิลร่วมกับสารเปอร์ซัลเฟต

เวลา (นาที)	pH 3		pH 5		pH 7		pH 9	
	Con.	Ct/C0	Con.	Ct/C0	Con.	Ct/C0	Con.	Ct/C0
0	4.888	1.000	4.412	1.000	4.796	1.000	4.709	1.000
5	5.353	1.097	6.114	1.386	4.687	0.977	4.660	0.979
10	5.581	1.144	5.769	1.308	4.581	0.955	4.416	0.896
20	4.825	0.988	5.534	1.254	4.538	0.947	4.076	0.835
30	4.535	0.932	4.891	1.109	4.412	0.920	4.053	0.886
60	3.328	0.686	4.154	0.940	4.170	0.870	3.963	0.796
90	3.215	0.661	4.663	1.054	4.078	0.851	3.563	0.716
120	2.904	0.594	4.248	0.961	3.931	0.820	3.359	0.711
180	3.166	0.651	3.793	0.858	2.988	0.624	3.115	0.613
240	3.484	0.713	3.633	0.826	2.807	0.585	2.705	0.535
300	2.993	0.614	3.409	0.773	2.700	0.563	2.491	0.522
360	2.902	0.595	3.315	0.752	2.634	0.549	2.353	0.477



ภาคผนวก ข

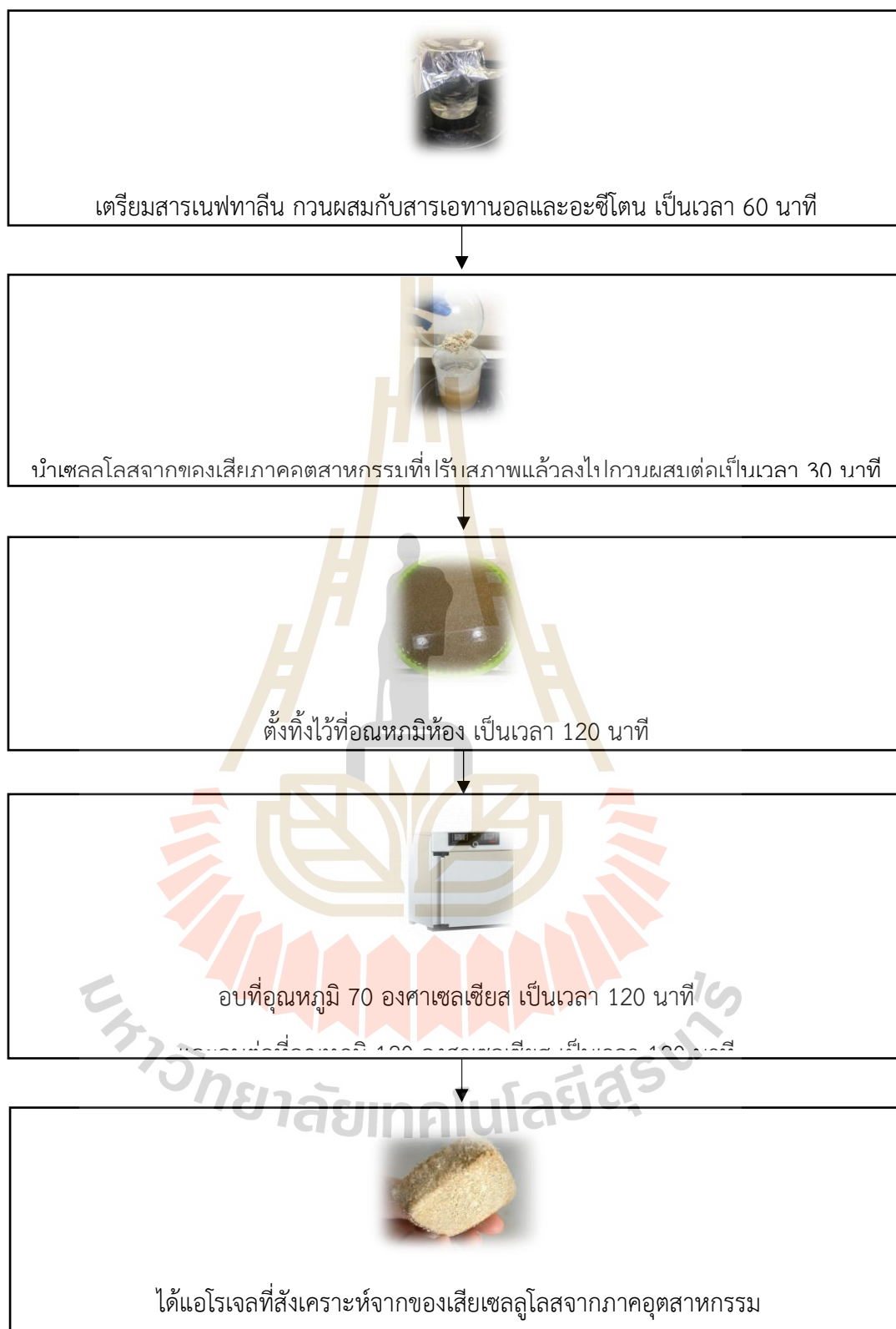
รูปประกอบการปรับสภาพของเสียชานอ้อยด้วยกระบวนการทางเคมี




รูปที่ ข.1 ขั้นตอนการปรับสภาพของเสียขาน้อยด้วยกระบวนการทางเคมี



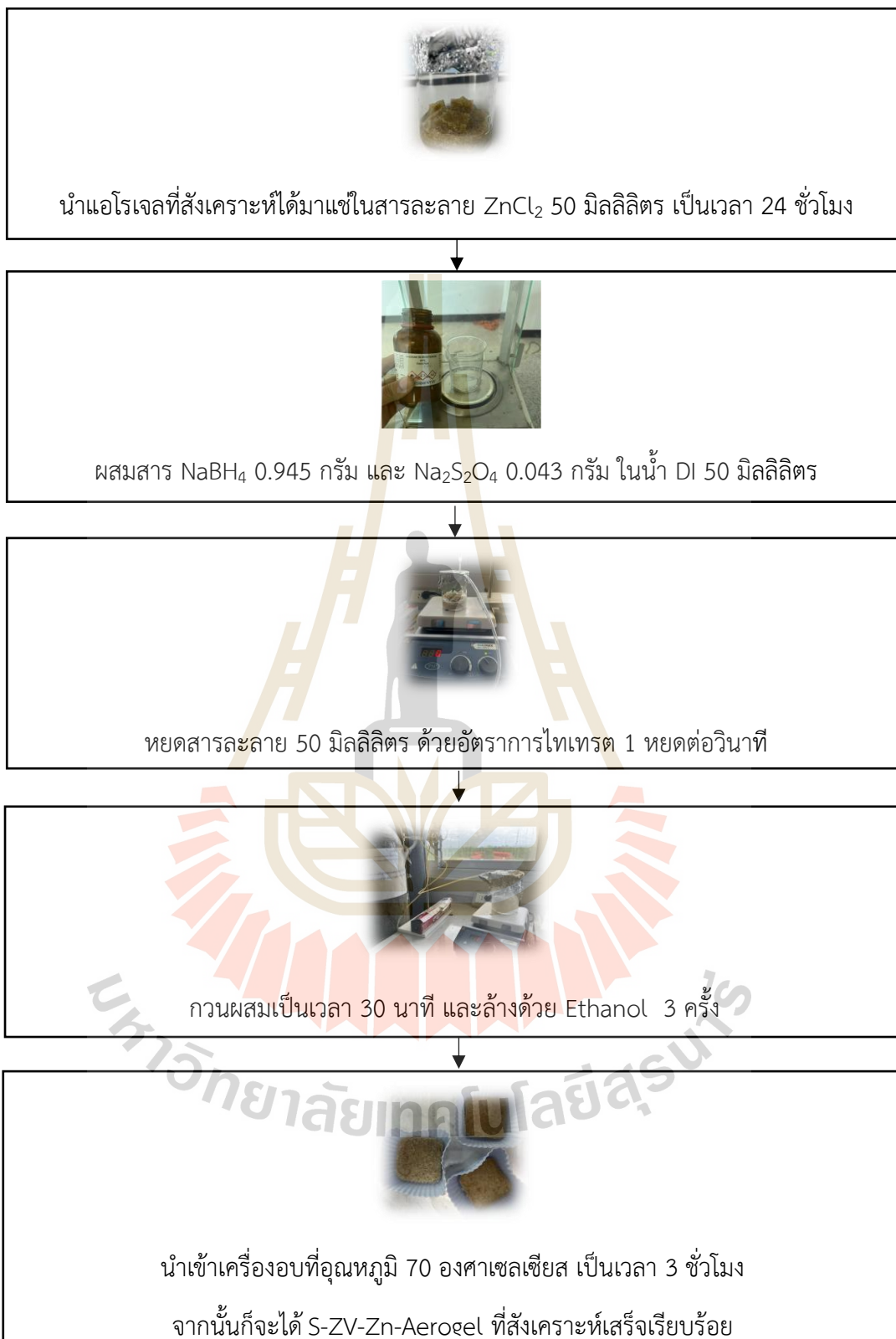
ภาคผนวก ค
รูปประกอบการสังเคราะห์แอร์เจล



รูปที่ ค.1 ขั้นตอนการสังเคราะห์แอโรเจลจากของเสียเซลล์โลส



ภาคผนวก ง
รูปประกอบการสังเคราะห์แอโรเจลผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุง
ด้วยซิลไฟต์ (S-ZV-Zn-Aerogel)



รูปที่ ง. ขั้นตอนการสังเคราะห์แอโรเจลที่ผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซิลไฟด์
(S-ZV-Zn-Aerogel)



ภาคผนวก จ

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Characterization of aerogel from sugarcane bagasse

Pariyaporn Seekhumlek¹, Lalita Kamolklang¹, Apichon Watcharenwong^{2*}

¹ Graduate student, School of Environmental Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand

² Lecturer, School of Environmental Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand

* Corresponding Author's E-mail address: w.apichon@sut.ac.th

Abstract :

Sugarcane is an important raw material in the sugar production industry. The sugar production process consists of seven main steps: harvesting, extraction, clarification, evaporation, sugar crystallization, crystal separation, and crystal drying. The extraction process involves grinding sugar cane to extract juice. The water is then collected in large containers for further processing. This is typically done using a grinder. However, when grinding sugarcane, bagasse waste is produced, which is a material left over from the production process. The sugar production industry produces a large amount of bagasse waste. Therefore, the researcher had an idea to synthesize this bagasse waste into an aerogel absorbent material from bagasse cellulose. The chemical composition of bagasse contains up to 45% alpha-cellulose. Therefore, bagasse is interesting to develop into cellulose aerogels. Aerogel refers to a synthetic material with low density and high surface area. This natural material can be used as a precursor for the synthesis of aerogels. In addition, the aerogel can be molded into the desired shape, which depends on the shape of the mold, and is left to become a gel with air by drying. The synthesis process of aerogel absorbent material using bagasse must be chemically treated with sodium hydroxide (NaOH), hydrogen peroxide (H₂O₂), and sulfuric acid (H₂SO₄) to remove hemicellulose and lignin. It can then be synthesized into cellulose aerogels. It uses an ambient pressure drying method to create aerogels. Ambient pressure drying is a simple and environmentally friendly technique. This research will use aerogels mixed with sulfide-modified zerovalent zinc aerogels to increase adsorption properties. The properties will be characterized using various techniques, including XRD, SEM, FTIR, XTM etc. From chemical pretreatment with sodium hydroxide (NaOH), hydrogen peroxide (H₂O₂), and sulfuric acid (H₂SO₄). Able to remove contaminants from bagasse waste and can reduce lignin and hemicellulose content, which is consistent with the results from the study of properties using FTIR, SEM, and XRD techniques. After that, the characteristics of the chemically treated bagasse were studied, and the bagasse was synthesized into an aerogel absorbent material mixed with sulfide-modified zerovalent zinc through an ambient pressure drying process. Later, the properties were studied using various techniques, namely SEM and XTM. The SEM technique found that the surface area characteristics of the aerogel were those of the mixed zerovalent zinc modified with sulfide. The fibers are not visible because the aerogel is coated with zerovalent zinc modified with sulfide. The results of the XTM technique revealed that when the aerogel was coated with zerovalent zinc modified with sulfide, the porosity decreased from 88% to 70%.

Keywords: Aerogel, Cellulose waste, Bagasse, The ambient pressure drying process, Zero-valent zinc

Introduction.

The industrial sector is an important force driving the domestic economy, including the food industry, automotive industry, electronic industry, rubber and plastic industry, paper industry, sugar industry, chemical industry, and petroleum industry. In the industrial sector, waste from the production process often occurs. For example, the sugar industry is a large agricultural product industry that can be processed in the sugar production process. Bagasse is a by-product remaining from the sugarcane grinding process by extracting sugarcane juice. Most of the remaining bagasse is sugarcane fiber. For 1 ton of fresh sugarcane, approximately 290 kilograms of bagasse will be left as waste from the production process. The sugar production industry in Thailand has a total of 57 sugar factories. In 2022, the Office of the Cane and Sugar Board reported that sugarcane consumption in the sugar production industry was approximately 94 million tons, which is considered high consumption [1]. As a result, the amount of bagasse waste remaining

from the sugarcane crushing process is as much as 27 million tons, and some sugar production industries have not yet put bagasse to use or burned. However, the chemical composition of bagasse consists of approximately 45% alpha cellulose, 27% hemicellulose, 21% lignin, and 7% others. Therefore, the researcher is aware of the importance of bagasse waste from the sugar production industry which can be developed and used in research studies. To synthesize bagasse waste into aerogel absorbent material, the bagasse must be chemically treated with alkali to remove hemicellulose and lignin. In addition, the physical properties of aerogels can be adjusted by various synthetic methods for application in a variety of applications. The aerogel absorbent material is a low-density and highly porous material. In addition, the synthesis of aerogels has received much attention and is the ultimate value addition. The aerogel synthesis process involves several forming methods, including supercritical drying, freeze drying, and ambient pressure drying, etc. Supercritical drying is used for synthesis at high temperature and pressure conditions. This makes the method energy-intensive, dangerous, and expensive [2], thus limiting it. Freeze-drying uses a freezing technique in which the wet gel liquid is frozen and then dried by sublimation. But it takes a long time, maybe more than 2 days [3]. If this method is used, complex freeze-drying equipment is required. The above two processes are not suitable alternatives for industrial-scale aerogel production. However, using atmospheric pressure drying is a simple technique. Energy-saving and safe, cost-effective, and environmentally friendly, which does not require complicated equipment [4]. The researcher is aware of the importance of industrial waste that can be developed and used in research studies. Therefore, the idea is to find a way to synthesize cellulose waste from this industry into aerogels, which are absorbent materials, and develop them into pesticide-absorbent materials modified with zinc sulfide centers. The mixing of zerovalent zinc to increase the efficiency of pesticide treatment. Therefore, pesticides gain electrons through redox reactions. This results in changes in the structure of pesticides. This reduces the toxicity of pesticides [5] and will result in zinc rust. However, the rust problem can be solved by adding sulfide to the zinc synthesis process [6]. The study steps are as follows: Cellulose waste pretreatment, synthesis of aerogels from cellulosic waste using an ambient pressure drying process, synthesis of sulfide-modified zerovalent zinc aerogels, and characterization using various techniques including FTIR, SEM, XTM, and XRD.

Experimental/methodology.

Material and chemicals. Cellulose was used from waste products from the sugar production industry. Bagasse from Nakhon Ratchasima Province. Sodium hydroxide solution 99 percent (RCI Labscan), Hydrogen peroxide (purity 30 percent, Quality Reagent Chemical), Naphthalene (Himedia), Ethanol (Duksan), Acetone (RCI Labscan), Polyvinyl alcohol (Mw 85,000-124,000, 99+% hydrolyzed, SIGMA ALDRICH), Zinc Chloride (Kemaus), Sodium borohydride 97% (Loba chemie) and Sodium hydrosulfite (Alfa Aesar).

Instruments. We used four techniques to characterize the aerogel and sulfide-modified zinc aerogel: Scanning Electron Microscope (SEM- JEOL/JSM-6010LV), X-ray Diffractometer (Bruker, D2 Phaser), Fourier Transform Infrared Microscope Spectrophotometry (FT-IR Microscope/TENSOR 27) and Synchrotron X-ray tomographic microscopy at beamline 1.2W was operated at 1.2GeV, 150 mA in Synchrotron Light Research Institute (SLRI).

Pretreatment of bagasse. Raw bagasse is pretreated with sodium hydroxide at a temperature of 80°C for 2 hours, then washed with deionized water until the pH is neutral. After that conditioned with hydrogen peroxide at a temperature of 80°C for 1 hour, then treated with sulfuric acid for 45 minutes, then washed with deionized water until the pH was neutral and dried at 80°C for 24 hours [7].

Synthesis of aerogels from cellulose waste. Using ambient pressure drying, prepare naphthalene (C₁₀H₈) and mix it with ethanol (C₂H₅OH) and acetone (C₃H₆O) stirring for 60 minutes, when the time is up, add the conditioned cellulose and polyvinyl alcohol solution, and stir for 30 minutes, and left at room temperature for 120 minutes. Finally, then bake at 70°C for 120 minutes and continue baking at 120°C for 120 minutes to obtain aerogels synthesized from cellulose waste [8].

Synthesis of sulfide-modified zero-valent zinc aerogel. The aerogels synthesized from sugarcane bagasse at ambient pressure were soaked in $ZnCl_2$ (0.1 mol/L) for 24 hours, specially treated with 0.945 g of $NaBH_4$ and 0.043 g of $Na_2S_2O_4$, 50 ml of DI water, and then dropped into $ZnCl_2$ with aerogel at the rate of 1 drop was stirred for 30 minutes and purged with nitrogen gas. After that, wash with ethanol three times again and bake for 2 hours at $60^\circ C$ [9]

Results and discussion.

From the research study, the synthesis of aerogel mixed with sulfide-modified zero-valent zinc, which consists of the bagasse pretreatment process, the process of synthesis of aerogels from cellulose waste, and the process of synthesis of sulfide-modified zero-valent zinc aerogel, shown as shown in **Figure 1**. However, an important part of this research is the study of properties, divided into two parts: first is the study of bagasse pretreatment characteristics. The properties were studied with various techniques: FTIR, SEM, and XRD. The second is the characterization of sulfide-modified zero-valent zinc aerogel which were studied with SEM and XTM.

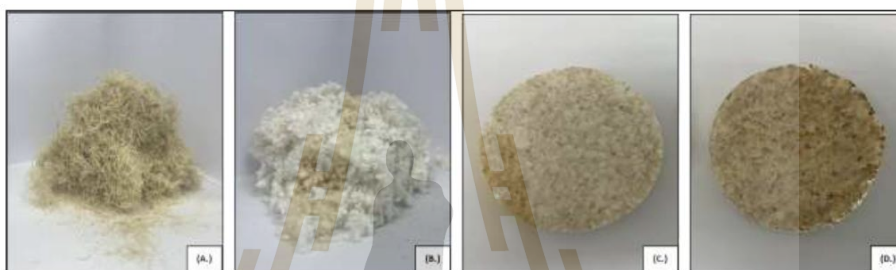


Figure 1. The synthesis process of aerogel mixed with sulfide-modified zero-valent zinc (A.) Raw bagasse (B.) Bagasse after pretreatment (C.) Aerogels from cellulose waste (D.) Aerogel mixed with sulfide-modified zero-valent zinc.

Bagasse pretreatment characteristics.

The properties were studied using various techniques including FTIR, SEM, and XRD. The results of the Fourier transform infrared spectrophotometer (FTIR) are shown in **Figure 2**. A peak at $2800-2900\text{ cm}^{-1}$ was found in both raw and pretreated bagasse samples, which were found to be C-H bonds of cellulose. A peak at 1598 cm^{-1} was found in only one raw sugarcane bagasse sample, which is a C=C bond, indicating the nature of the aromatic ring of lignin. A peak at $1,310\text{ cm}^{-1}$ was found in both raw and pretreated bagasse samples, indicating the characteristics of cellulose, and a peak at $1,161\text{ cm}^{-1}$ was found in only one raw sugarcane bagasse sample, which is a C=O bond, indicating the nature of hemicellulose [10] The results of the study found that when raw sugarcane bagasse is pretreated with a chemical process, it can reduce the amount of hemicellulose and lignin in raw sugarcane bagasse.

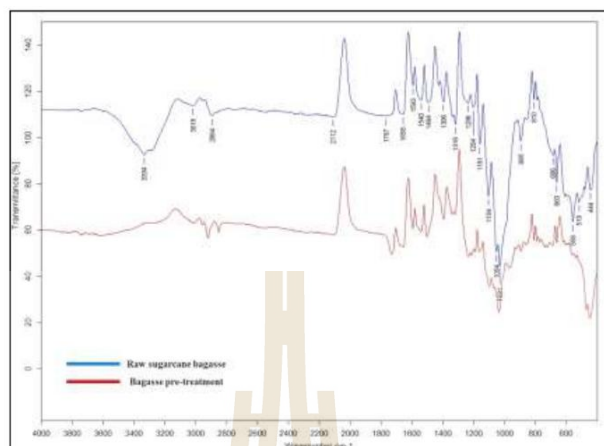


Figure 2. Results of Fourier-transform infrared spectroscopy technique of bagasse waste pretreatment

The results of the scanning electron microscope (SEM) are shown in Figure 3. Scanning electron microscopy was used to study the surface of the samples to study the morphology of two samples, both raw and pretreated bagasse. Chemical treatment with sodium hydroxide (NaOH), hydrogen peroxide (H₂O₂), and sulfuric acid (H₂SO₄), where pretreatment can help remove impurities from raw sugar cane fibers on the surface.

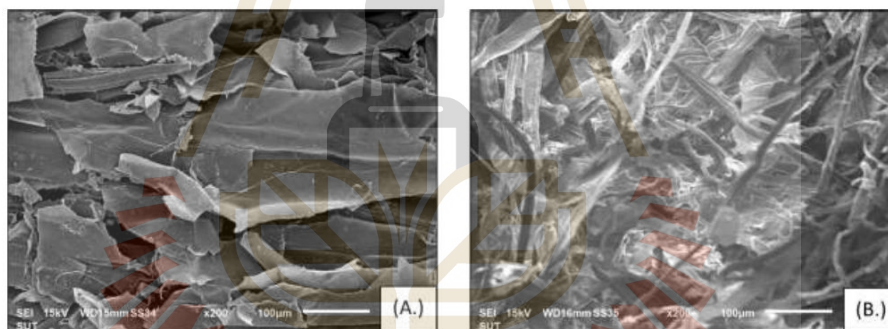


Figure 3. Results of Scanning Electron Microscope (SEM) technique of bagasse waste pretreatment (A.) Raw bagasse (B.) Bagasse waste pretreatment

The results of the X-ray Diffractometer (XRD) study are shown in Figure 4. To study the crystal structure of two samples, raw sugarcane bagasse and chemically treated bagasse. This is because cellulose has a crystalline structure, while hemicellulose and lignin are amorphous. The crystalline peak has a 2θ value of 220 or the 002 plane, and the amorphous peak has a 2θ value of 160 or the 101 plane. From the results of the research, it was found that after pretreatment, the crystallinity value was higher than that of untreated raw sugarcane bagasse. This is consistent with the results of molecular structure analysis using the FTIR technique, which confirmed that lignin and hemicellulose can be reduced [11]. The XRD results can be converted to crystallinity index values (Crystallinity Index; CrI) calculated in Equation (1)

$$\text{Crystallinity index (\%)} = \left[\frac{I_{002} - I_{101}}{I_{002}} \right] * 100 \quad (1)$$

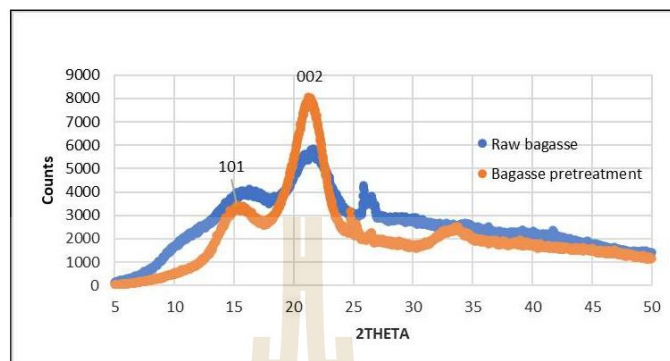


Figure 4. Results of X-ray Diffractometer (XRD) technique of bagasse waste pretreatment (A.) Raw sugarcane bagasse (B.) bagasse waste pretreatment

Table 1 The X-ray Diffractometer (XRD) results show the crystallinity index. (Crystallinity index; CrI) of raw and pretreated bagasse.

Sample	Crystallinity index; CrI
(A.) Raw bagasse	42.95
(B.) Pretreated bagasse waste	67.41

From **Table 1**, calculate the crystallinity index according to **Equation 1**. It was found that the crystallinity index value when comparing raw bagasse and bagasse treated with NaOH, H₂O₂, and H₂SO₄ had a higher crystallinity index value indicating an increased proportion of cellulose after pretreatment. This shows that with chemical pretreatment the amorphous part can be removed [12].

Characteristics of sulfide-modified zero-valent zinc aerogel.

The properties were studied using SEM and XTM techniques. The surface morphologies of sulfide-modified zero-valent zinc aerogel by the scanning electron microscopy (SEM) technique are shown in **Figure 5**. The SEM results in **Figure 5A**, there were visible gaps between the bagasse fibers, but in **Figure 5B**, the fibers were not visible because the aerogel was coated with sulfide-modified zero-valent zinc.

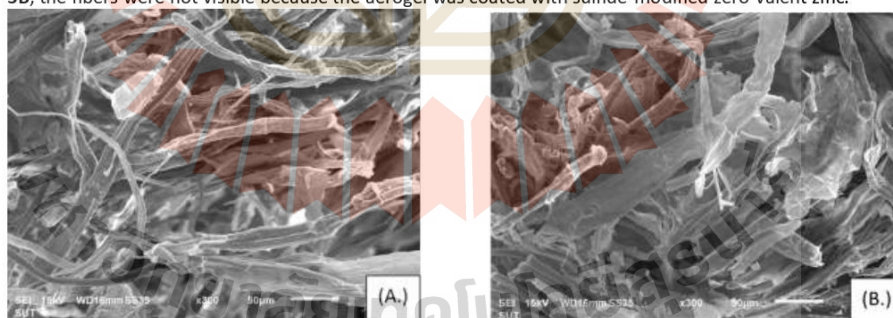


Figure 5. Results of scanning electron microscopy (SEM) technique of the synthesis process of sulfide-modified zerovalent zinc aerogel (A.) Aerogel (B.) Sulfide-modified zerovalent zinc aerogel

X-ray 3D characteristics and porosity (%) of sulfide-modified zerovalent zinc aerogels were studied using the X-ray Tomographic Microscopy (XTM) technique, the results are shown in **Figure 6**. In this research, aerogel samples synthesized from bagasse cellulose and aerogel mixed with sulfide-modified zero-valent zinc were studied. The XTM results in **Figure 6A**, show a 3D tomographic and porosity of 88%, and in **Figure 6B**, the porosity of 70% because the aerogel was coated with sulfide-modified zinc ionic centers. As a result, the porosity value decreases.

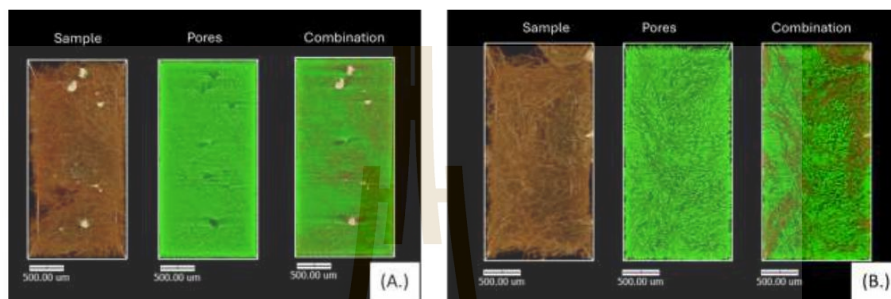


Figure 6. Results of the X-ray Tomographic Microscopy (XTM) technique of the synthesized aerogel (A.) Bagasse aerogel (B.) Sulfide-modified zerovalent zinc aerogel.

Conclusions.

This research studies the synthesis of aerogels from sugarcane bagasse waste, which is chemically adjusted with sodium hydroxide, hydrogen peroxide, and sulfuric acid to remove lignin, and hemicellulose contaminants from bagasse fibers. Then its properties were investigated using various techniques, namely FTIR, SEM, and XRD. The results of (FT-IR) found that the chemically pretreated bagasse sample was able to remove lignin and hemicellulose, which was consistent with the XRD result. It was found that the crystallinity index of cellulose increased for the chemically pretreated bagasse sample. From SEM images, it is found that when chemically adjusted it was able to remove impurities from the fibers. After that, the bagasse cellulose was synthesized into an aerogel absorbent material mixed with sulfide-modified zerovalent zinc through an ambient pressure drying process. Later, the properties were studied using SEM and XTM techniques. The SEM technique found that the surface area characteristics of the aerogel were those of the mixed zinc modified with sulfide. The fibers are not visible because the aerogel is coated with sulfide-modified zerovalent zinc. The results of the XTM technique revealed that when the aerogel was coated with sulfide-modified zinc, the porosity decreased from 88% to 70%.

Acknowledgment.

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] Pimchanok Iamwithwanich (2015). Cellulose aerogel prepared from cotton fiber scraps by alternating freezing and thawing cycles. Master of Science Thesis Department of Petrochemical and Polymer Science Chulalongkorn University.
- [2] Maleki, H. Durães, L. Portugal, A. (2014) An overview on silica aerogels synthesis and different mechanical reinforcing strategies. *J. Non-Cryst. Solids* 385, 55.
- [3] Parale, V.G. Han, W. Lee, K.-Y. Park, H.-H. (2018) Ambient pressure dried tetrapropoxysilane-based silica aerogels with high specific surface area. *Solid State Sci.* 75,63.
- [4] Jackson de Moraes Rocha, G., Martin, C., Soares, I. B., Souto Maior, A. M., Baudel, H. M., & Moraes de Abreu, C. A. (2011). Dilute mixed-acid pretreatment of sugarcane bagasse for ethanol production. *Biomass and Bioenergy*, 35(1), 663-670. doi:10.1016/j.biombioe.2010.10.018
- [5] Stergar, J., & Maver, U. (2016). Review of aerogel-based materials in biomedical applications. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 77(3), 738-752. doi:10.1007/s10971-016-3968
- [6] Yu, M. Li, J. Wang, L. (2016) Preparation and characterization of magnetic carbon aerogel from pyrolysis of sodium carboxymethyl cellulose aerogel crosslinked by iron trichloride. *J. Porous Mater.* 23, 997.

- [7] Kanokwan Maharatchamongkol (2015). THE SILANE TREATMENT ON THE SURFACE OF CELLULOSE FIBER FROM RICE STRAW AS A REINFORCED MATERIAL IN EPOXY RESIN. Master of Science Program in Chemical Studies Department of Chemistry Graduate School Silpakorn University.
- [8] Ebrahimi, A., Dahrzma, B., & Adelifard, M. (2020). Facile and novel ambient pressure drying approach to synthesis and physical characterization of cellulose-based aerogels.
- [9] Dong, H., Zhang, C., Deng, J., Jiang, Z., Zhang, L., Cheng, Y., . . . Zeng, G. (2018). Factors influencing degradation of trichloroethylene by sulfide-modified nanoscale zero-valent iron in aqueous solution. *Water Res*, 135, 1-10. doi:10.1016/j.watres.2018.02.017.
- [10] ALEMDAR, AYSE and MOHINI SAIN. Isolation and characterization of nanofibers from agricultural residues – Wheat straw and soy hulls. *Bioresource Technol.* 2008, 99, 1664–1671.
- [11] BONDESON, D., A. MATHEW and K. OKSMAN. Optimization of the isolation of nanocrystals from microcrystalline cellulose by acid hydrolysis. *Cellulose*. 2006, 13, 171–180.
- [12] MD. SAKINUL ISLAM, NHOL KAO, SATI N. BHATTACHARYA, RAHUL GUPTA and PRADIPTO K. BHATTACHARJEE. Effect of low pressure alkaline delignification process on the production of nanocrystalline cellulose from rice husk. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2017, 80, 820–834.
-



ประวัติผู้เขียน

นางสาวปริยาพร สีชุมเหล็ก เกิดเมื่อวันที่ 6 พฤษภาคม พ.ศ. 2540 ณ จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนชัยภูมิภักดีชุมพล อำเภอเมืองชัยภูมิ จังหวัดชัยภูมิ ในปีการศึกษา 2558 ได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาตรีจากสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2562 และได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท ในปีถัดมา โดยได้รับทุนการศึกษาจากทุนวิจัยจากแหล่งทุนภายนอกจากกองทุนสนับสนุนการวิจัย และพัฒนา (ทุน OROG) ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เมื่อเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทได้ศึกษาและวิจัยในหัวข้อ “การบำบัดเมโทรลิตด้วยแอโรเจลผสมกับสังกะสีประจุศูนย์ที่ปรับปรุงด้วยซัลไฟด์” ในขณะที่ศึกษาอยู่ได้มีโอกาสเป็นผู้ช่วยสอนในรายวิชาของสาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม เพื่อเพิ่มพูนความรู้ใหม่ ทักษะการวิจัย รู้จักแก้ปัญหา และการทำงานเป็นกลุ่มเพื่อบรรลุเป้าหมายที่วางไว้ นอกจากนี้มีโอกาสเข้าร่วมการนำเสนอผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการระดับชาติ “การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 22” จัดโดยสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย เมื่อวันที่ 17-18 พฤษภาคม 2566 ณ โรงแรมจอมเทียน ปาล์มบีช โฮเทล แอนด์ รีสอร์ท พัทยา โดยนำเสนองานวิจัยเรื่อง “การสังเคราะห์แอโรเจลด้วยเซลลูโลสของเสียภาคอุตสาหกรรมโดยกระบวนการทำแห้งด้วยแรงดันบรรยากาศ” ต่อมาได้เข้าร่วมการนำเสนอผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ “International Conference on Integrated Science: Bioscience and Bioinnovation for Sustainability and Forensic Science (BBFS2024)” เมื่อวันที่ 6-7 มิถุนายน 2567 ณ มหาวิทยาลัยขอนแก่น โดยนำเสนองานวิจัยเรื่อง “Characterization of aerogel from sugarcane bagasse” และได้เข้าร่วมการนำเสนอผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ “IWA 21st International Conference on Navigating Diffuse Pollution” เมื่อวันที่ 11-14 ธันวาคม 2567 ณ โรงแรม ดิ เอ็มเพรส เชียงใหม่ โดยนำเสนองานวิจัยเรื่อง “Comparative Study of Advanced Oxidation Processes for Decolorization of Ethanol Production Wastewater: Application of BMG-order Kinetic Model” และได้มีการตีพิมพ์ใน Thai Environmental Engineering Journal หัวข้อเรื่อง “Synthesis of Cassava Rhizome Biochar for Methomyl Adsorption” Vol. 38 No. 3 (2024) จำนวน 1 ฉบับ