

## 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) สารเคมีที่ใช้เพื่อกำจัดแมลง (Insecticides)

สารเคมีในกลุ่มนี้ถูกออกแบบมาเพื่อควบคุมและกำจัดแมลงที่เป็นศัตรูของพืช เช่น แมลงที่กัดกินใบพืชหรือเจาะลำต้น เป็นต้น เช่น คาร์บาเมต ไฮเปอร์เมทริน มาลาไทออน ฟิริมेटริน เป็นต้น

##### 2) สารเคมีที่ใช้เพื่อกำจัดหนูและสัตว์ฟันแทะ (Rodenticides)

สารเคมีในกลุ่มนี้ใช้สำหรับกำจัดหนูและสัตว์ฟันแทะที่เป็นศัตรูของพืชหรือศัตรูในสิ่งแวดล้อม เช่น คุมาดิน บรอมะฟีโนส วาร์ฟาริน เป็นต้น

##### 3) สารเคมีที่ใช้เพื่อกำจัดเชื้อรา (Fungicides)

สารเคมีในกลุ่มนี้มีประสิทธิภาพในการควบคุมและกำจัดเชื้อราที่เป็นตัวรบกวนในพืช เช่น โพรคลอราซ มานโคซิบ คลอโรทาโลนิล แซงคอสโตรบิน เป็นต้น

##### 4) สารเคมีที่ใช้เพื่อกำจัดวัชพืช (Herbicides)

สารเคมีในกลุ่มนี้ออกแบบมาเพื่อควบคุมหรือกำจัดวัชพืชที่มีอายุยาวนานหรืออาจตายยาก เช่น ไกลโฟเซต แอตราซีน มีโทรดิน ดิควานิล เป็นต้น

ดังนั้นเกษตรกรจึงจำเป็นต้องพัฒนาวิธีการทำเกษตรกรรมอย่างยั่งยืนที่สามารถใช้ทรัพยากรที่มีอยู่ให้เต็มประสิทธิภาพ และนำเทคโนโลยีในการควบคุมวัชพืชเข้ามาใช้เพื่อลดความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นจากการขาดแคลนแรงงาน นอกจากนี้ยังควรใช้สารกำจัดศัตรูพืชอย่างมีความระมัดระวัง เพื่อป้องกันความเสี่ยงต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพมนุษย์และสัตว์ได้ (อนุสรณ์ แก้วการ, 2562) โดยในประเทศไทยมีการนำเข้าสารกำจัดศัตรูพืชมาใช้ในการเกษตรในปริมาณเพิ่มขึ้นทุกปี 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 (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักตัว) 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 <sub>50</sub> 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	เมทิดาไธออน (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

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

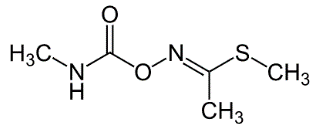
ตารางที่ 2.3 สมบัติความเป็นพิษของสารกำจัดศัตรูพืชที่ต้องเฝ้าระวัง 12 ชนิด (สำนักโรคจากการประกอบอาชีพและสิ่งแวดล้อม, 2556) (ต่อ)

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 ตัวหมัดผัก	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 ( $\text{Cl}^-$ ) 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

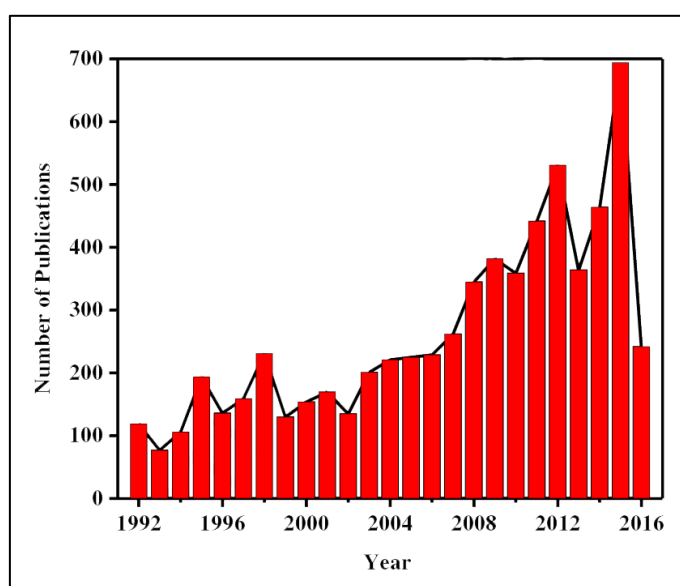
ตารางที่ 2.5 การควบคุมทางกฎหมายเกี่ยวกับสารเมไธมิลของแต่ละประเทศ (กรมควบคุมมลพิษ, 2541)

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	ออกกฎหมายกำหนดให้ปริมาณสูงสุดของเมไธมิลที่มีได้ในผลิตภัณฑอาหารมีค่าอยู่ระหว่าง 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 เริ่มมีการตีพิมพ์งานวิจัยเกี่ยวกับแอโรเจลเพิ่มมากขึ้น (Maleki et al., 2016) แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 จำนวนงานเกี่ยวกับแอโรเจลที่ถูกตีพิมพ์ในแต่ละปีที่ผ่านมา (Maleki et al., 2016)

### 2.3.1 การจำแนกประเภทและสมบัติของแอโรเจล

แอโรเจลสามารถจำแนกได้หลายวิธีตามลักษณะทางกายภาพ โครงสร้างรูพรุน และองค์ประกอบทางเคมี โดยการจำแนกตามลักษณะที่ปรากฏสามารถพบได้ในรูปแบบของผง ฟิล์ม และแผ่นขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตและความต้องการใช้งาน 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 ซึ่งเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและมีต้นทุนต่ำ 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 นอกจากนี้แอโรเจลยังมีการนำความร้อนต่ำอยู่ในช่วง 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

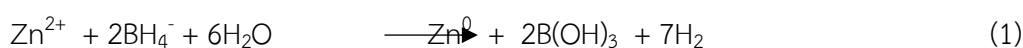
สีขาว ซึ่งแตกต่างจากโลหะทรานซิชันอื่นๆ ที่มีสถานะออกซิเดชัน +2 ซึ่งโดยทั่วไปแล้วมักแสดงสีที่แตกต่างกัน

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, Fe<sup>0</sup>) และสังกะสีประจุศูนย์ (Zerovalent Zinc, Zn<sup>0</sup>) โดยงานวิจัยนี้ศึกษาการใช้สังกะสีประจุศูนย์ซึ่งเป็นสารรีดิวซ์ที่มีศักยภาพสูงกว่าเหล็กประจุศูนย์ เนื่องจากสังกะสีประจุศูนย์มีค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน (E<sup>0</sup> = -0.762 โวลต์) ซึ่งเป็นค่าลบมากกว่าเหล็กประจุศูนย์ (E<sup>0</sup> = -0.441 โวลต์) ทำให้สังกะสีประจุศูนย์สามารถให้อิเล็กตรอนได้ง่ายกว่าและมีความสามารถในการรีดิวซ์สารมลพิษที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงได้ดีกว่า ด้วยเหตุนี้สังกะสีประจุศูนย์จึงได้รับความสนใจอย่างมากในฐานะตัวรีดิวซ์ทางเลือกที่สามารถนำไปใช้ในการกำจัดสารมลพิษที่มีโครงสร้างซับซ้อน เช่น สารประกอบฮาโลเจนและยาฆ่าแมลงประเภทออร์กาโนฟอสเฟต (Shah et al., 2019)

#### 2.4.2 การสังเคราะห์สังกะสีประจุศูนย์

กระบวนการสังเคราะห์สังกะสีประจุศูนย์จะเกิดขึ้นโดยใช้ปฏิกิริยารีดอกซ์ระหว่างสารละลายไอออนสังกะสี (Zn<sup>2+</sup>) และสารรีดิวซ์ที่มีศักยภาพสูง เช่น โซเดียมโบโรไฮไดรด์ (NaBH<sub>4</sub>) ในสถานะที่มีการควบคุมอย่างเหมาะสม โดยทั่วไปแล้วไอออนสังกะสีมักได้จากสารประกอบสังกะสี เช่น ZnCl<sub>2</sub> หรือ ZnSO<sub>4</sub> ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับ NaBH<sub>4</sub> ในสารละลายที่เป็นด่างจะเกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนทำให้ไอออนสังกะสีถูกรีดิวซ์เป็น สังกะสีประจุศูนย์ในรูปของอนุภาคขนาดนาโน ปฏิกิริยานี้มักต้องดำเนินการภายใต้สภาวะที่มีการไหลของก๊าซไนโตรเจน (N<sub>2</sub>) 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

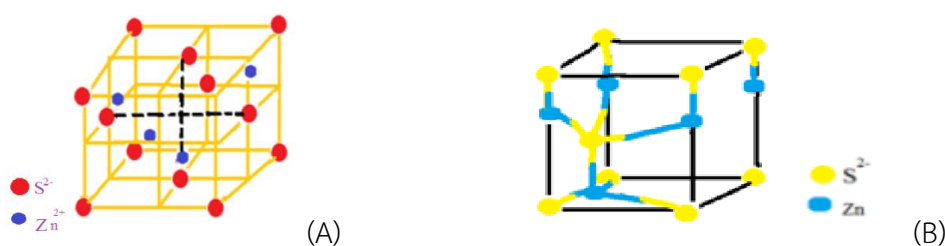


จากสมการที่ 1 ในกระบวนการนี้ไอออนสังกะสีที่ละลายในสารละลายจะถูกรีดิวซ์ให้เป็นสังกะสีประจุศูนย์ซึ่งไอออนสังกะสีที่อยู่ในสารละลายจะได้รับอิเล็กตรอนจาก  $\text{NaBH}_4$  ซึ่งเป็นตัวรีดิวซ์ที่มีศักย์รีดอกซ์ต่ำ ทำให้สามารถปลดปล่อยอิเล็กตรอนเพื่อเปลี่ยนไอออนสังกะสีให้เป็นสังกะสีประจุศูนย์ได้ โดยไซเตียมโบโรไฮไดรด์ทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนแก่ไอออน  $\text{Zn}^{2+}$  ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจาก  $\text{Zn}^{2+}$  ไปเป็น  $\text{Zn}^0$  ซึ่งอนุภาคสังกะสีประจุศูนย์ที่เกิดขึ้นมักจะมีขนาดเล็กเป็นผงสีเทาและสามารถออกซิไดซ์ได้ง่ายเมื่อสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ ดังนั้นกระบวนการสังเคราะห์มักดำเนินการในสภาวะที่มีการไหลของแก๊สไนโตรเจนอย่างต่อเนื่อง เพื่อป้องกันไม่ให้ออกซิเจนจากอากาศเข้าไปในระบบและทำให้เกิดซิงค์ออกไซด์ซึ่งอาจลดประสิทธิภาพของอนุภาคสังกะสีที่เตรียมได้

## 2.5 สังกะสีที่ดัดแปลงด้วยซัลไฟด์ (Sulfide modified Zinc, S-Zn)

ซิงค์ซัลไฟด์ ( $\text{ZnS}$ ) 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

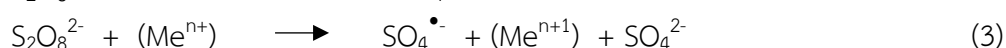
ปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalysis) สำหรับการบำบัดน้ำเสียและการผลิตพลังงานสะอาด โดยใช้แสงในการกระตุ้นปฏิกิริยาเคมีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Ranjith et al., 2017) เป็นต้น

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) ได้รับความสนใจอย่างมากในปัจจุบันเนื่องจากมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียและกำจัดสารพิษในน้ำอุปโภคที่ใช้ในการดำเนินการนี้มักมีต้นทุนต่ำและไม่ซับซ้อน อีกทั้งยังสามารถกำจัดสารมลพิษได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง (Anirudhan et al., 2017) กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงใช้การสร้างอนุมูลอิสระที่มีประจุสูง เช่น อนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ( $\cdot\text{OH}$ ) ซึ่งสามารถทำลายสารเคมีที่เป็นอันตรายหรือสารอินทรีย์ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ง่ายในสภาพแวดล้อมธรรมชาติ โดยปฏิกิริยาออกซิเดชันนี้มีความเร็วสูงและสามารถใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากแหล่งต่าง ๆ ได้ดีโดยเฉพาะในกรณีที่สารพิษมีความเข้มข้นสูงหรือยากต่อการย่อยสลายด้วยวิธีการธรรมดา เช่น น้ำเสียจากอุตสาหกรรมเคมีและการเกษตร กระบวนการนี้ยังช่วยลดสารพิษที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติและช่วยฟื้นฟูคุณภาพน้ำให้สะอาดขึ้นตามมาตรฐานการใช้งาน

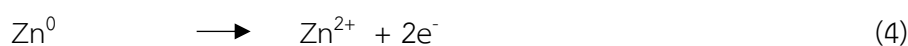
สารเปอร์ซัลเฟต (Persulfate , PS ,  $S_2O_8^{2-}$ ) เป็นสารประกอบออกซิไดซ์ที่มีคุณสมบัติเด่นในด้านความเสถียรซึ่งมันสามารถคงตัวได้ดีในสภาวะแวดล้อมทั่วไปโดยไม่สลายตัวเองอย่างง่ายตาย โดยเฉพาะที่อุณหภูมิห้องและในน้ำ ซึ่งเปอร์ซัลเฟตสามารถแตกตัวและปลดปล่อยอนุมูลอิสระซัลเฟต ( $SO_4^{\bullet-}$ ) ออกมาได้ เมื่อได้รับการกระตุ้นอย่างเหมาะสม (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 ซึ่งกระบวนการย่อยสลายสารปนเปื้อนโดยใช้สังกะสีประจุศูนย์สามารถเกิดขึ้นได้ ทั้งทางตรงและทางอ้อม โดยกระบวนการย่อยสลายโดยตรงจะเกิดขึ้นเมื่อสังกะสีประจุศูนย์ให้อิเล็กตรอนให้กับสารปนเปื้อนทำให้สารเหล่านั้นถูกรีดิวซ์เป็นรูปที่มีความเป็นพิษน้อยลงหรือไม่เป็นพิษ ในขณะที่กระบวนการย่อยสลายทางอ้อมจะเกี่ยวข้องกับการสร้างอนุมูลอิสระที่มีปฏิกิริยาสูง เช่น อนุมูลอิสระซูเปอร์ออกไซด์ ( $O_2^{\bullet -}$ ) 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 พบว่าสังกะสีประจุศูนย์กระตุ้นเปอร์ซัลเฟตมีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดยาไซโปรฟลอกซาซิน 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 โดยประสิทธิภาพการย่อยสลายเพิ่มขึ้นเมื่อใช้สถานะที่เป็นกรดอ่อน อุณหภูมิสูง และมีปริมาณสังกะสีประจุศูนย์และเปอร์ซัลเฟตที่เหมาะสม นอกจากนี้ยังพบว่าอนุมูลอิสระซัลเฟตมีบทบาทสำคัญในกลไกการย่อยสลายมากกว่าอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลซึ่งจะเห็นได้ว่าสังกะสีประจุศูนย์เป็นตัวกระตุ้นเปอร์ซัลเฟตมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อมคองโกเรด และสามารถประยุกต์ใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

ดังนั้นสังกะสีประจุศูนย์เป็นตัวกระตุ้นเปอร์ซัลเฟตที่มีประสิทธิภาพสูงในการย่อยสลายทั้งสารปนเปื้อนประเภทสารอินทรีย์ โดยสามารถสร้างอนุมูลออกซิแดนซ์ที่มีพลังงานสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้สถานะที่เหมาะสม ทำให้สังกะสีประจุศูนย์เป็นตัวกระตุ้นเปอร์ซัลเฟตที่มีศักยภาพในการประยุกต์ใช้จริงในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย

## 2.7 จลนพลศาสตร์การดูดซับ

สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับที่นิยามกันอย่างแพร่หลายคือ 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 <sup>-1</sup> )
	q <sub>t</sub>	คือ	ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	q <sub>e</sub>	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

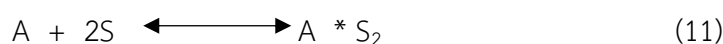
$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad (10)$$

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 (นาที<sup>-1</sup>)  
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 ฝ้าย 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 อุณหภูมิที่ใช้สำหรับกระบวนการโซเดียมไฮดรอกไซด์และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อยู่ที่ 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 ดังนั้นการศึกษากการปรับสภาพของเยื่อเซลลูโลสด้วยกระบวนการทางเคมี 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 <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 30% (w/v)	120 60	80 80	-ค่าความเป็นผลึกมีค่าสูงขึ้น -สามารถทำลายโครงสร้างลิกนินและ เฮมิเซลลูโลสได้
Theamdee et al. (2023)	ชานอ้อย	NaOH 20% (w/v) H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 10% (v/v)	120 -	120 -	-ค่าความเป็นผลึกมีค่าสูงขึ้นแสดงถึง เซลลูโลสมีความบริสุทธิ์ขึ้น -หลังปรับสภาพสามารถจัด 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 ส่งผลให้แอโรเจลมีความหนาแน่นที่สูงขึ้นอยู่ที่ 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 <sup>3</sup> - 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 <sup>3</sup> - พื้นที่ผิวจำเพาะ 208 m <sup>2</sup> /g	-
Zhang et al. (2022)	Cellulose Acetate	-	- บ่มที่อุณหภูมิ 75°C เป็นเวลา 3 วัน - ทำการบ่มเจลในอ่างน้ำร้อน - อบต่อ 80 °C	- ค่านำความร้อนที่ 0.033 m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	-
Wu et al. (2023)	Cellulose Nanofiber	Engine Oil	- บ่มที่อุณหภูมิห้อง - แอโรเจลถูกปล่อยให้แห้งอย่างช้า ๆ ไม่ได้ระบู่ไว้อย่างชัดเจน	- ความหนาแน่นต่ำ 10 mg/cm <sup>3</sup>	- 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 ผลการศึกษาพบว่าสังกะสีประจุศูนย์ที่เกิดขึ้นมีขนาดอนุภาคเล็กลงสี่เท่าและมีการกระจายตัวสม่ำเสมอมากขึ้น 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"> <li>- <math>Zn^0</math> เป็นอนุภาคสีน้ำตาลดำ ขนาดผลึกมีขนาดใหญ่กว่า 100 ไมโครเมตร</li> <li>- ผลการดูดซับเหมาะสมกับแบบจำลอง Langmuir</li> <li>- การศึกษาจลนพลศาสตร์สอดคล้องกับแบบจำลองอันดับสองเทียม</li> </ul>
Taherkhani et al. (2019)	สารตั้งต้น : $ZnCl_2$ ผสมกับ $ZnO$ สารรีดิวซ์ : $NaBH_4$	กำจัดเมทิลออร์เอนท์ ในน้ำ	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>Zn^0</math> เป็นอนุภาคของแข็งสีเทา การวิเคราะห์ SEM พบว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยของ <math>Zn^0</math> อยู่ที่ประมาณ 100 นาโนเมตร การวิเคราะห์ XRD พบว่าขนาดผลึกของ <math>Zn^0</math> คือ 28 นาโนเมตร</li> <li>- การย่อยสลายเป็นไปตามแบบจำลองจลนศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม</li> <li>- ผง <math>ZnO</math> และ <math>Zn^0</math> มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดเมทิลออร์เอนท์ในน้ำ</li> </ul>
Shah et al. (2019)	สารตั้งต้น : $Zn(NO_3)_2$ สารรีดิวซ์ : $NaBH_4$	กำจัดคลอรีนไฟรฟอส ในน้ำ (CPY)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>Zn^0</math> เป็นอนุภาคของแข็งสีเทา การวิเคราะห์ FESEM ของ <math>Zn^0</math> แสดงโครงสร้างนาโนแบบหลายชั้นหรือคล้ายแผ่น ซึ่งกว้าง 50–100 นาโนเมตร และหนา 3–5 นาโนเมตร การวิเคราะห์ TEM พบจุดมืดบางจุดที่อาจเกิดจากการรวมตัวของอนุภาค <math>Zn^0</math></li> <li>- nZVZn สามารถกำจัด CPY ได้ 55% ภายในเวลา 90 นาที</li> <li>- เมื่อเติม PMS ประสิทธิภาพการกำจัด CPY เพิ่มขึ้นเป็น 99.5%</li> </ul>
Rahmani et al. (2017)	สารตั้งต้น : $ZnCl_2$ สารรีดิวซ์ : $NaBH_4$	กำจัดยาไซโปรฟลอกซาซิน (Ciprofloxacin)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>Zn^0</math> เป็นตะกอนสีขาว การวิเคราะห์ TEM พบว่ามีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 25 นาโนเมตร</li> <li>- สามารถกำจัดยาไซโปรฟลอกซาซินได้ 55% ภายใต้เงื่อนไข คือ pH 4.5 KPS = 1200 มก./ลิตร และปริมาณ NZVZ = 120 มก./ลิตร</li> </ul>

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

ตารางที่ 2.9 การใช้สารเปอร์ซัลเฟตในการกำจัดมลพิษ (ต่อ)

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

## 2.8.5 การบำบัดสารเมโรมิลด้วยกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงเป็นเทคนิคสำคัญที่ถูกนำมาใช้ในการกำจัดสารเมโรมิลจากน้ำเสีย โดยกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงอาศัยการสร้างอนุมูลอิสระที่มีศักยภาพสูง เช่น อนุมูลอิสระไฮดรอกซิล และอนุมูลอิสระซัลเฟต ซึ่งสามารถทำลายโครงสร้างของเมโรมิลผ่านกระบวนการออกซิเดชัน กระบวนการเหล่านี้สามารถดำเนินการได้โดยใช้เทคนิคต่าง ๆ เช่น การใช้สารเปอร์ซัลเฟตที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต ความร้อน หรือไอออนโลหะ เช่น ไอออนเหล็กซึ่งช่วยเร่งการสลายตัวของสารเมโรมิลให้เร็วขึ้น อีกทั้งเทคโนโลยีโฟโตคะตาไลซิสที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) 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 ซึ่งเหล็กประจุศูนย์ร่วมกับเปอร์ออกซีไดซัลเฟตแสดงให้เห็นถึงศักยภาพที่สูงกว่าในการบำบัดสารเมธิลในน้ำ เนื่องจากมีความเสถียรสูงกว่าและสามารถนำไปใช้ในสภาพแวดล้อมที่ซับซ้อนได้ดี ในขณะที่ไฟโรต์-เปอร์ออกซีไดซัลเฟตแม้ว่าจะมีประสิทธิภาพสูงในการทดลองระยะสั้น แต่มีข้อจำกัดในด้านความคงทนและการนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งเหล็กประจุศูนย์ร่วมกับเปอร์ออกซีไดซัลเฟตเป็นทางเลือกที่เหมาะสมมากกว่าในการบำบัดสารกำจัดศัตรูพืชในแหล่งน้ำที่ปนเปื้อน ซึ่งการศึกษาการบำบัดสารเมธิลด้วยกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงซึ่งได้ทำการสรุปงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องดังตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 การบำบัดสารเมโรมิลด้วยกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง

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