

บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สารกำจัดศัตรูพืช (Pesticides)

สารเคมีกำจัดศัตรูพืช (Pesticide) หมายถึง สารเคมีหรือส่วนผสมของสารเคมีที่มีวัตถุประสงค์สำหรับ การฆ่า การป้องกัน การทำลาย และการควบคุมต่อศัตรูพืช ซึ่งในทางกฎหมายสารเคมีกำจัดศัตรูพืชทุกชนิดจัดเป็นวัตถุอันตรายตามพระราชบัญญัติวัตถุอันตราย พ.ศ.2535 จึงจำเป็นต้องมีมาตรการควบคุมการผลิต นำผ่าน นำเข้า ส่งออก และบางชนิดต้องมีการขออนุญาตเพื่อจะมีไว้ในครอบครอง (กรมควบคุมโรค, 2556)

สารเคมีกำจัดศัตรูพืชในทางการเกษตรสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ ๆ ได้ทั้งหมด 4 ชนิด ได้แก่

- 1) สารเคมีกำจัดแมลง (Insecticide)
- 2) สารเคมีป้องกันกำจัดวัชพืช (Herbicide)
- 3) สารเคมีป้องกันกำจัดเชื้อรา (Fungicide)
- 4) สารเคมีกำจัดสัตว์ฟันแทะ (Rodenticides)

โดยสารกำจัดแมลง (Insecticide) สามารถแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มหลักตามโครงสร้างทางเคมี ได้แก่

- 1) ออร์กาโนฟอสเฟต (Organophosphates) สารเคมีในกลุ่มนี้มีองค์ประกอบของฟอสฟอรัส
- 2) ออร์กาโนคลอรีน (Organochlorines) สารเคมีในกลุ่มนี้มีโครงสร้างประกอบด้วยคลอรีน
- 3) คาร์บาเมท (Carbamate) สารเคมีในกลุ่มนี้มีโครงสร้างคาร์บาเมท
- 4) ไพรีทรอยด์ (Pyrethroids) สารเคมีในกลุ่มนี้สังเคราะห์จากไพรีทริน

ในปัจจุบันมีการนำเข้าสู่สารกำจัดวัชพืช สารกำจัดแมลง สารป้องกัน และกำจัดโรคพืชทางการเกษตรชนิดอื่น ๆ เป็นปริมาณมาก ซึ่งบ่งชี้ว่าเกษตรกรมีการนิยมใช้สารเคมีกำจัดศัตรูพืชกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากการใช้สารเคมีกำจัดศัตรูพืชมีต้นทุนที่ต่ำกว่าการใช้แรงงานคนในการกำจัดศัตรูพืช อย่างไรก็ตามการที่จะใช้งานสารเคมีกำจัดศัตรูพืชจำเป็นต้องมีความรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติเบื้องต้นของสารเคมีกำจัดศัตรูพืช เนื่องจากสารเคมีกำจัดศัตรูพืชมีอันตรายต่อตัวผู้ใช้งานรวมถึงสัตว์และสิ่งแวดล้อมได้ (อนุสรณ์, 2562) จากข้อมูลสถิติการนำเข้าวัตถุอันตรายทางการเกษตร พบว่าสารกำจัดวัชพืช สารกำจัดแมลง สารป้องกัน สารกำจัดโรคพืช และสารปราบศัตรูพืชชนิดอื่น ๆ ที่มีการนำเข้าตามข้อมูลของสำนักควบคุมพืชและวัสดุการเกษตร กรมวิชาการเกษตร ซึ่งได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 2.1 ในปัจจุบันประเทศไทยมีการเปลี่ยนแปลงไปจากภาคเกษตรไปเป็นภาคกึ่งอุตสาหกรรมทำให้แรงงานในภาคการเกษตรขาดแคลน การควบคุมและกำจัดศัตรูพืชจึงมีความสำคัญ เนื่องจากเกษตรกรยังต้องการเพิ่มผลผลิต จึงทำให้มีการใช้สารเคมีกำจัดศัตรูพืชในปริมาณที่มากขึ้น จากการใช้สารกำจัดศัตรูพืชที่มากขึ้นทำให้กรมควบคุมโรคเห็นควรว่าต้องมีสารกำจัดศัตรูพืชที่ต้องเฝ้าระวัง 12 ชนิด

ตามข้อมูลของสำนักควบคุมพืชและวัสดุการเกษตร กรมวิชาการเกษตร ปี พ.ศ. 2556 (ตารางที่ 2.2) ซึ่งเป็นสารในกลุ่มเดียวกับวัตถุอันตรายที่กรมวิชาการเกษตรเฝ้าระวัง ซึ่งสารกำจัดศัตรูพืชกลุ่มนี้เป็นสารที่อยู่ในข่ายที่ต้องเฝ้าระวังในการใช้เนื่องจากเป็นสารที่มีปริมาณการใช้มาก มีความเป็นพิษสูง หรือมีการตกค้างระยะยาวในสิ่งแวดล้อม

ตารางที่ 2.1 ปริมาณการนำเข้าวัตถุอันตรายทางการเกษตรของประเทศไทยปี 2562-2566

ปี	สารกำจัดวัชพืช	สารกำจัดแมลง	สารป้องกันและกำจัดโรคพืช	รวม
	ปริมาณ (ตัน)	มูลค่า (ล้านบาท)	ปริมาณ (ตัน)	มูลค่า (ล้านบาท)
2562	75,218.75	5,238.18	8,931.95	3,314.75
2563	42,642.81	7,859.50	12,761.51	9,941.44
2564	55,945.46	8,947.12	16,113.69	3,478.35
2565	59,257.62	9,749.81	11,369.96	2,717.47
2566	77,235.21	19,623.89	15,078.57	3,261.23

หมายเหตุ : สำนักควบคุมพืชและวัสดุการเกษตร กรมวิชาการเกษตร, 2567

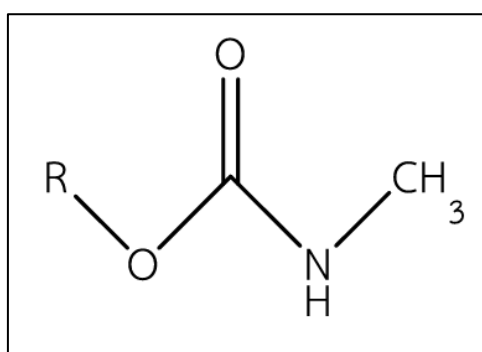
ตารางที่ 2.2 สารกำจัดศัตรูพืชและความเป็นพิษที่ต้องเฝ้าระวัง 12 ชนิด

ลำดับ	ชื่อสารเคมี	กลุ่ม	ระดับพิษ	LD ⁵⁰ (mg/kg)
1	อัลดีคาร์บ (Aldicarb)	Carbamate	la	0.93
2	บลาสติซิดิน-เอส (Blasticidin-s)	Antibiotic	lb	16
3	คาร์โบฟูราน (Carbofuran)	Carbamate	lb	8
4	ไดโครโทฟอส (Dicrotophos)	Organophosphate	lb	22
5	อีพีเอ็น (EPN)	Organophosphate	la	14
6	อีโธโปรฟอส (Ethoprosfos)	Organophosphate	la	33
7	โฟมีทานเนต (Formethanate)	Carbamate		21
8	เมทิดาไรออน (Methidathion)	Organophosphate	lb	25
9	เมโธมิล (Methomyl)	Carbamate	lb	17
10	อ็อกซามิล (Oxamyl)	Carbamate	lb	6
11	เอ็นโดซัลแฟน (Endosulfan)	Organochloride	li	80
12	พาราไรออนเมทิล (Parathion Methyl)	Organophosphate	la	14

หมายเหตุ : สำนักควบคุมพืชและวัสดุการเกษตร กรมวิชาการเกษตร, 2556

2.2 สารคาร์บาเมท (Carbamate)

สารกลุ่มคาร์บาเมท (Carbamate) เป็นกลุ่มสารเคมีที่ใช้ในการกำจัดแมลงและศัตรูพืช มีการนำสารคาร์บาเมทหลายชนิดมาใช้ในภาคเกษตรกรรมและการควบคุมแมลง ได้แก่ อัลดีคาร์บ (Aldicarb) คาร์โบฟูแรน (Carbofuran) ออกซามิล (Oxamyl) และเมโธมิล (Methomyl) สารเหล่านี้มักใช้ในรูปแบบของสเปรย์ (sprays) หรือเหยื่อล่อ (baits) เพื่อช่วยลดปริมาณศัตรูพืชที่ทำลายผลผลิตทางการเกษตร (Zhang et al., 2012) โดยมีสารออกฤทธิ์ที่ทำงานผ่านการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์โคลีนเอสเตอเรส (Cholinesterase) ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่สำคัญต่อระบบประสาทของแมลงและสัตว์อื่น ๆ เมื่อเอนไซม์นี้ถูกยับยั้งระบบประสาทจะทำงานผิดปกติและทำให้แมลงหรือศัตรูพืชตายไปในที่สุด (Ecobichon, D. J., 2001) โดยมีโครงสร้างพื้นฐานเป็นคาร์บาเมทอนุพันธ์ของกรดคาร์บามิก (Carbamic acid) ซึ่งเป็นกลุ่มสารเคมีกำจัดศัตรูพืชที่ใช้ในการควบคุมแมลงและศัตรูพืชอื่น ๆ สูตรโครงสร้างทั่วไปของสารเคมีกำจัดแมลงกลุ่มคาร์บาเมทแสดงดังรูปที่ 2.1 นอกจากนี้ การสัมผัสกับสารกลุ่มคาร์บาเมทจะส่งผลกระทบต่อร่างกายมนุษย์ตามตารางที่ 2.3



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างทั่วไปของสารเคมีกำจัดแมลงกลุ่มคาร์บาเมท

ตารางที่ 2.3 อาการและความรุนแรงของการเกิดพิษของสารกลุ่มคาร์บาเมท

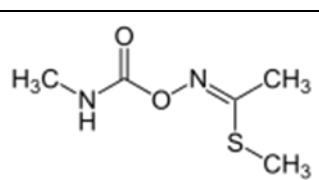
ระดับ	ระยะเวลาสัมผัส	อาการ
1. ไม่รุนแรง	4-24 ชั่วโมง	มีอาการเหนื่อย อ่อนแรง วิงเวียน และคลื่นไส้
2. รุนแรงปานกลาง	4-24 ชั่วโมง	มีอาการปวดศีรษะ เหงื่อแตก น้ำตา และน้ำลายไหล อาเจียน และสายตาพราง
3. รุนแรงมาก	>24 ชั่วโมง	เป็นตะคริวที่ท้อง ปัสสาวะราด ท้องเสีย กล้ามเนื้อสั่น ม่านตาหด ความดันโลหิตต่ำ หัวใจเต้นช้า หายใจขัด และหากไม่ได้รับการรักษาโดยทันทีจะเสียชีวิตในที่สุด

หมายเหตุ : (จาตุรงค์, 2565)

2.3 เมโทมิล (Methomyl)

เมโทมิลเป็นสารเคมีกำจัดศัตรูพืช (Pesticide) จัดอยู่ในสารกำจัดแมลง ที่อยู่ในกลุ่มคาร์บาเมท ซึ่งมีความเป็นพิษในระดับ Ib หลายประเทศมีการยกเลิกการใช้และการผลิตแล้ว เนื่องจากผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม แต่ในประเทศไทยยังเป็นสารกำจัดศัตรูพืชที่ต้องเฝ้าระวัง ข้อมูลคุณสมบัติของเมโทมิลแสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของเมโทมิล (Methomyl)

คุณสมบัติ	พารามิเตอร์	
สูตรโมเลกุล (Molecular formula)	C ₅ H ₁₀ N ₂ O ₂ S	
สูตรโครงสร้าง (Structural formula)		
น้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight)	162.2 กรัมต่อโมล	
ปริมาตรโมเลกุล (Molecular Volume)	179.9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล	
ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ที่ 24 องศาเซลเซียส	1.2946	
จุดหลอมเหลว (Melting point)	78 - 79 องศาเซลเซียส	
ลักษณะทางกายภาพ (physical state)	ลักษณะเป็นผลึกของแข็ง, สีขาว	
Log K _{ow}	0.60	
pKa	13.27	
LD ⁵⁰	17	
CAS Number	16752-77-5	
ความสามารถในการละลาย (Solubility) ในสารละลายต่างๆ (กรัมต่อกิโลกรัมของตัวทำละลายที่ 25 องศาเซลเซียส)	Water	58
	Ethanol	420
	Toluene	30
	Acetone	720
	Methanol	1000
	Isopropanol	220
ความดันไอ (vapor pressure)	0.00005 มิลลิเมตรปรอท (24 องศาเซลเซียส)	
	0.000016 มิลลิเมตรปรอท (40 องศาเซลเซียส)	

หมายเหตุ : (ภูสิต, 2558; Srikhaow et al., 2022)

2.3.1 คุณสมบัติที่มีผลต่อการเคลื่อนย้ายของเมโรมิล

คุณสมบัติที่สำคัญซึ่งส่งผลต่อการเคลื่อนย้ายของเมโรมิลในสิ่งแวดล้อมคือ ความสามารถในการละลายน้ำ โดยเมโรมิลมีค่าการละลายน้ำสูงถึง 58 กรัมต่อลิตร ซึ่งจัดว่าอยู่ในระดับที่ละลายน้ำได้ดีมาก ทำให้เมื่อมีการพ่นสารนี้ในพื้นที่เกษตรกรรม เมโรมิลจะอยู่ในเฟสน้ำเป็นหลัก และสามารถถูกชะล้างออกจากพื้นที่เพาะปลูกผ่านฝนหรือระบบชลประทานลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้อย่างง่ายดาย (Lin et al., 2020) นอกจากนี้ ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนออกทานอล-น้ำ (Octanol-water partition coefficient, K_{OW}) ของเมโรมิลอยู่ที่ 0.60 ซึ่งจัดอยู่ในระดับต่ำ แสดงให้เห็นว่าสารนี้มีแนวโน้มที่จะไม่สะสมในสิ่งมีชีวิตหรือเนื้อเยื่อที่มีไขมัน แต่จะคงอยู่ในเฟสน้ำเป็นหลัก และสามารถแพร่กระจายไปยังแหล่งน้ำต่าง ๆ ได้ (Srikhaow et al., 2022) ขณะที่ความดันไอ (Vapor Pressure) ของเมโรมิลมีค่าค่อนข้างต่ำคือ 0.00005 มิลลิเมตรปรอท ที่อุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียส และ 0.000016 มิลลิเมตรปรอท ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ซึ่งบ่งชี้ว่าสารนี้มีแนวโน้มระเหยเข้าสู่บรรยากาศได้น้อย ยกเว้นในกรณีที่เกิดละอองน้ำขณะพ่นอาจเกิดการเคลื่อนย้ายในอากาศในปริมาณเล็กน้อย (ภูสิต, 2558)

2.3.2 พฤติกรรมของเมโรมิลในดิน

เมโรมิลมีความสามารถในการเคลื่อนที่ในดินที่ค่อนข้างสูง เนื่องจากมีความสามารถในการละลายน้ำสูง เท่ากับ 58 กรัมต่อลิตรที่ 25 องศาเซลเซียส ทำให้มันสามารถเคลื่อนที่ผ่านชั้นดินได้ง่าย โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีการชลประทานหรือมีการใช้น้ำในการทำเกษตร เมื่อมีการรดน้ำหรือฝนตก สารนี้จะถูกล้างออกจากดินและอาจซึมเข้าสู่แหล่งน้ำใต้ดินหรือแหล่งน้ำผิวดินได้ นอกจากนี้จากการศึกษาของ Kroeksakul et al., 2023 ที่ดำเนินการในพื้นที่เกษตรบนที่ราบสูงของประเทศไทย พบว่ามีการปนเปื้อนของเมโรมิลในดินถึง 0.11 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมของดิน ซึ่งแม้จะอยู่ในระดับต่ำแต่ยังสามารถตรวจพบได้ เมโรมิลแสดงความสัมพันธ์ทางบวกอย่างมีนัยสำคัญกับปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดและปริมาณธาตุเหล็กในดิน ($p < 0.01$) และการเคลื่อนที่ของเมโรมิลในดินยังมีความสัมพันธ์กับเนื้อดินและลักษณะทางกายภาพของดิน เช่น ดินที่มีการระบายน้ำดีและเนื้อหยาบ อย่างดินทรายมีแนวโน้มที่จะทำให้เมโรมิลเคลื่อนที่ได้เร็ว เพราะอนุภาคดินมีพื้นที่ผิวที่ต่ำสำหรับจับยึดสารเคมีในทางกลับกันดินที่มีปริมาณอินทรีย์สูงหรือเนื้อดินละเอียดอาจจับสารเคมีไว้ได้มากกว่า นอกจากนี้การศึกษาของ Yang, G. P., et al., 2005 รายงานไว้ว่าปัจจัยภายนอก เช่น อุณหภูมิและค่าความเป็นกรดต่างของดินมีผลต่อการดูดซับของเมโรมิล โดยอุณหภูมิที่สูงและค่าค่าความเป็นกรดต่างที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับเมโรมิลลดลง ทั้งนี้คุณสมบัติการละลายน้ำสูงของเมโรมิลยังส่งผลให้สามารถแพร่กระจายลงสู่แหล่งน้ำได้ง่าย โดยเฉพาะในดินที่มีการระบายน้ำดีและมีเนื้อหยาบ ซึ่งมีแนวโน้มทำให้เมโรมิลเคลื่อนที่และปนเปื้อนในแหล่งน้ำได้มากกว่าดินเนื้อละเอียด

2.3.3 พฤติกรรมของเมโรมิลในน้ำ

เมโรมิลในน้ำแสดงพฤติกรรมที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับสภาพค่าความเป็นกรดต่างของสภาพแวดล้อม โดยในสถานะที่เป็นกรดและเป็นกลาง (pH 6 ถึง 7) เมโรมิลมีความเสถียรที่ค่อนข้างสูง ทำให้ค่าครึ่งชีวิตอยู่ที่ประมาณ 30 วัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในสภาพน้ำที่มีค่าความเป็นกรดต่างเหล่านี้ เมโรมิลจะสลายตัวช้าและคงอยู่ในน้ำได้เป็นระยะเวลาานาน แต่ในทางกลับกันเมื่อสภาพน้ำเปลี่ยนไปเป็นด่าง (pH มากกว่า 9) เมโรมิลจะสลายตัวได้เร็วขึ้น เนื่องจากไฮดรอกไซด์ไอออนในสภาพ

ต่างเร่งกระบวนการไฮโดรไลซิส ส่งผลให้ค่าครึ่งชีวิตลดลงเหลือเฉลี่ยประมาณ 6 วัน นอกจากนี้ปัจจัยด้านแสงแดดโดยเฉพาะแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) ยังมีบทบาทสำคัญในการเร่งกระบวนการสลายตัวของแสงซึ่งเป็นปฏิกิริยาแสงที่ทำให้เมโรมิลสลายตัวได้รวดเร็วขึ้นในสภาพแวดล้อมที่มีการรับแสงเข้มข้น ปัจจัยเหล่านี้รวมกันทำให้การสลายตัวของเมโรมิลในน้ำเป็นเรื่องที่ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย โดยเฉพาะค่าความเป็นกรดต่างและความเข้มของแสงแดด (Mortensen & Serex, 2014) อย่างไรก็ตามจากการตรวจวัดในสิ่งแวดล้อม พบว่าเมโรมิลสามารถปนเปื้อนในแหล่งน้ำธรรมชาติได้ โดยตรวจพบในน้ำใต้ดินที่ระดับ 10 ไมโครกรัมต่อลิตร (Farré et al., 2002) และคลองในฟาร์มสตอร์วเบอร์รี่ที่ระดับ 30 ไมโครกรัมต่อลิตร (Cid et al., 2006) ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐานความปลอดภัยที่หน่วยงานสหภาพยุโรป (EU) กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำดื่มไว้ในคำสั่งปี 2020/2184 (ไม่เกิน 0.1 ไมโครกรัมต่อลิตร สำหรับสารกำจัดศัตรูพืชชนิดเดียวในน้ำผิวดิน) สะท้อนถึงความเสี่ยงในการปนเปื้อนของสารนี้ในระบบนิเวศน้ำ และความจำเป็นในการควบคุมการใช้และกำจัดสารนี้อย่างมีประสิทธิภาพ (Srikhaow et al., 2022)

2.3.4 ความเป็นพิษของเมโรมิล

เมโรมิลเป็นสารกำจัดแมลงในกลุ่มคาร์บาเมท โดยสารเคมีกลุ่มนี้มีไนโตรเจน (N) เป็นองค์ประกอบสำคัญ ซึ่งเมโรมิลเป็นสารที่มีความเป็นพิษสูงทั้งต่อมนุษย์และสัตว์ เนื่องจากมีฤทธิ์ในการยับยั้งเอนไซม์อะเซทิลโคลีนเอสเตอเรสซึ่งเป็นเอนไซม์ที่สำคัญในการทำลายสารสื่อประสาทอะเซทิลโคลีนทำให้เกิดการสะสมของอะเซทิลโคลีนในระบบประสาท ส่งผลให้เกิดอาการเป็นพิษ มีค่าความเป็นพิษเฉียบพลันค่า LD₅₀ ของเมโรมิลสำหรับหนูอยู่ที่ประมาณ 17 ถึง 24 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ภูสิต, 2558)

2.3.5 ค่ามาตรฐานการปนเปื้อนของเมโรมิล

ค่ามาตรฐานของเมโรมิลที่กำหนดโดย สหภาพยุโรป (EU) กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำดื่มไว้ในคำสั่งปี 2020/2184 ว่าด้วยคุณภาพน้ำที่ใช้เพื่อการบริโภคของมนุษย์ ซึ่งกำหนดค่าความเข้มข้นสูงสุดของสารกำจัดศัตรูพืชแต่ละชนิดไว้ที่ 0.1 ไมโครกรัมต่อลิตร สำหรับเมโรมิล และกำหนดค่าความเข้มข้นรวมของสารกำจัดศัตรูพืชทั้งหมดในน้ำดื่มต้องไม่เกิน 0.5 ไมโครกรัมต่อลิตร (Srikhaow, A., et al., 2022)

2.4 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับเป็นกระบวนการที่โมเลกุลของสารละลายที่ถูกจับไว้ออกจากสารละลายของเหลว โดยจะมีสารสองชนิดมาสัมผัสกัน และมีความเข้มข้นของสารเพิ่มขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัส โดยสารละลายที่มีตัวถูกดูดซับ จะสัมผัสรวมกับวัสดุที่เป็นตัวดูดซับซึ่งองค์ประกอบแต่ละชนิดในสารละลายมีความสามารถในการกระจายบนผิวและเกิดแรงดูดซับได้ต่างกัน โดยการดูดซับจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุนของตัวดูดซับ คุณสมบัติทางเคมีของตัวดูดซับและสารที่ถูกดูดซับ อุณหภูมิ ค่าความเข้มข้น ค่าความเป็นกรดต่างของสารละลาย ระยะเวลาที่สารละลายสัมผัสกับสารดูดซับ เป็นต้น

2.4.1 ประเภทของการดูดซับ

ปัจจัยสำคัญในการบ่งบอกชนิดของกระบวนการดูดซับ พิจารณาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับ โดยแรงยึดเหนี่ยวเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Forces) จะเป็นการดูดซับทางกายภาพ แต่ถ้าแรงยึดเหนี่ยวทำให้เกิดพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับจะเรียกว่า การดูดซับทางเคมี

2.4.1.1 การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption)

การดูดซับทางกายภาพเป็นกระบวนการที่สารโมเลกุลจากเฟสหนึ่งมีสถานะเป็นก๊าซหรือของเหลวเกาะติดกับพื้นผิวของของแข็ง ซึ่งเป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน คือแรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals Forces) การดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนทำให้การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อย คือ ต่ำกว่า 20 กิโลจูลต่อโมลและสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่าย การดูดซับทางกายภาพของไบโอชาร์ต่อสารกำจัดศัตรูพืช การดูดซับทางกายภาพเป็นหนึ่งในกลไกหลักที่ไบโอชาร์ใช้ในการตรึงสารกำจัดศัตรูพืชในดิน กลไกนี้อาศัยคุณสมบัติทางโครงสร้างของไบโอชาร์ เช่น พื้นที่ผิวจำเพาะ โครงสร้างรูพรุนหลายระดับ และแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่เกี่ยวข้องกับพันธะโควาเลนต์ การดูดซับประเภทนี้ช่วยลดการเคลื่อนที่ของสารกำจัดศัตรูพืชในดิน และป้องกันการชะล้างสารพิษเข้าสู่แหล่งน้ำใต้ดิน เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ กลไกการเติมเต็มรูพรุน (Pore-filling Mechanism) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ (Dong et al., 2024) แรงแวนเดอร์วาลส์เป็นแรงระหว่างโมเลกุลที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของการกระจายตัวของอิเล็กตรอนในอะตอมและโมเลกุล ซึ่งทำให้เกิดไดโพลโมเมนต์ชั่วคราว และส่งผลให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของสารกำจัดศัตรูพืชและพื้นผิวของไบโอชาร์ แรงแวนเดอร์วาลส์มักเกิดขึ้นระหว่างไบโอชาร์ที่มีโครงสร้าง คาร์บอนอะโรมาติกกับสารกำจัดศัตรูพืชที่เป็นโมเลกุลไม่มีขั้ว (Non-Polar Molecules) โมเลกุลของสารกำจัดศัตรูพืชสามารถเกาะติดกับพื้นผิวของไบโอชาร์ผ่านแรงแวนเดอร์วาลส์ โดยไม่ต้องมีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น เป็นแรงที่มีพลังงานต่ำเมื่อเทียบกับแรงอื่น ๆ เช่นพันธะโควาเลนต์ แต่มีความสำคัญอย่างมากต่อการดูดซับของสารอินทรีย์ที่ละลายในน้ำ (Cheng et al., 2022) กลไกการเติมเต็มรูพรุน เป็นกระบวนการที่โมเลกุลของสารกำจัดศัตรูพืชถูกดูดซับเข้าไปภายในรูพรุนของไบโอชาร์ โดยไม่ต้องอาศัยแรงทางเคมีหรือปฏิกิริยาทางไฟฟ้าสถิต ซึ่งไบโอชาร์มีโครงสร้างรูพรุนหลายระดับ ได้แก่ รูพรุนขนาดเล็ก (Micropores) มีขนาดน้อยกว่า 2 นาโนเมตร รูพรุนขนาดกลาง (Mesopores) มีขนาด 2 ถึง 50 นาโนเมตร รูพรุนขนาดใหญ่ (Macropores) มีขนาดมากกว่า 50 นาโนเมตร รูพรุนเหล่านี้ทำหน้าที่เป็น อ่างเก็บกักเก็บที่ช่วยตรึงสารกำจัดศัตรูพืชไว้ในดิน โมเลกุลของสารกำจัดศัตรูพืชสามารถถูกตรึงภายในรูพรุนได้โดยไม่สามารถเคลื่อนที่ออกจากพื้นผิวไบโอชาร์ได้ง่าย (Cheng et al., 2022)

2.4.1.2 การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption)

การดูดซับทางเคมีเป็นกระบวนการที่สารโมเลกุลจากเฟสหนึ่งมีสถานะเป็นก๊าซหรือของเหลว เกาะติดกับพื้นผิวของของแข็งโดยการสร้างพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลของสารกับพื้นผิวของวัสดุดูดซับ การดูดซับประเภทนี้มักจะมีพลังงานที่เกี่ยวข้องสูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับทางกายภาพ การดูดซับทางเคมีเกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวถูกดูดซับเดิม คือมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง

อะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิมแล้วมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ขึ้น โดยมีพันธะเคมี ซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง ซึ่งการดูดซับทางเคมีจะมีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงประมาณ 50 ถึง 400 กิโลจูลต่อโมล การดูดซับทางเคมีเป็นกลไกสำคัญที่ทำให้ไบโอชาร์สามารถตรึงสารกำจัดศัตรูพืชได้อย่างมีประสิทธิภาพ กลไกนี้เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมีระหว่างหมู่ฟังก์ชันของไบโอชาร์กับหมู่ฟังก์ชันของสารกำจัดศัตรูพืช โดยอาศัยแรงยึดเหนี่ยวที่แข็งแรงกว่าการดูดซับทางกายภาพ กลไกหลักของการดูดซับทางเคมี แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bonding) ปฏิสัมพันธ์ $\pi-\pi$ ($\pi-\pi$ Interactions) และแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Attraction) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

พันธะไฮโดรเจน เป็นกลไกสำคัญของการดูดซับทางเคมี ซึ่งเกิดจากการปฏิสัมพันธ์ระหว่างอะตอมไฮโดรเจนกับหมู่ฟังก์ชันที่มีอิเล็กตรอนอิสระ เช่น ออกซิเจน (O) ไนโตรเจน (N) และฟลูออรีน (F) หมู่ฟังก์ชันของไบโอชาร์ที่สามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนได้ ได้แก่ หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) หมู่คาร์บอกซิล (-COOH) หมู่แอลดีไฮด์ (-CHO) และหมู่เอมิโน (-NH₂) ในขณะที่สารกำจัดศัตรูพืชที่มีหมู่ฟังก์ชัน -OH -COOH -NH₂ และ -C=O จะมีแนวโน้มสูงในการสร้างพันธะไฮโดรเจนกับพื้นผิวของไบโอชาร์ ตัวอย่างเช่น อาหาราซินสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของไบโอชาร์ได้ พันธะไฮโดรเจนช่วยให้สารกำจัดศัตรูพืชถูกตรึงไว้ ส่งผลให้การเคลื่อนที่ของสารกำจัดศัตรูพืชในดินลดลง คงตัวเป็นเวลานานขึ้น และลดความเสี่ยงของการชะล้างลงสู่แหล่งน้ำได้ (Cheng et al., 2022; Mandal et al., 2016)

ปฏิสัมพันธ์ $\pi-\pi$ เป็นกลไกสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับของไบโอชาร์ที่มีโครงสร้างอะโรมาติก โดยไบโอชาร์ที่ผลิตที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส จะมีโครงสร้างคาร์บอนอะโรมาติกที่เสถียรและมีความเป็นกราดิฟสูง ทำให้เกิด π -electron cloud ซึ่งสามารถเกิดการทับซ้อนกับโครงสร้างอะโรมาติกของสารกำจัดศัตรูพืชที่เป็นสารอินทรีย์ สารกำจัดศัตรูพืชที่สามารถเกิดปฏิสัมพันธ์ $\pi-\pi$ ได้ เช่น ไดยูรอน (Diuron) อาหาราซิน (Atrazine) และพาราควอต (Paraquat) ซึ่งมีโครงสร้างอะโรมาติกที่สามารถเกิด $\pi-\pi$ Stacking กับพื้นผิวไบโอชาร์ได้ ปฏิสัมพันธ์นี้ช่วยให้สารกำจัดศัตรูพืชถูกตรึงบนพื้นผิวของไบโอชาร์อย่างแน่นหนา และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับสารกำจัดศัตรูพืชประเภทอะโรมาติกได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ ยังช่วยลดการปลดปล่อยของสารกำจัดศัตรูพืชออกสู่สิ่งแวดล้อม ทำให้สามารถควบคุมปริมาณของสารเคมีในดินและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Cheng et al., 2022; Mandal et al., 2016)

แรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต เป็นกลไกที่มีบทบาทสำคัญในการดูดซับสารกำจัดศัตรูพืช โดยแรงดึงดูดนี้เกิดจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างประจุของไบโอชาร์และสารกำจัดศัตรูพืช ซึ่งมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการดูดซับของวัสดุ ไบโอชาร์ที่มีประจุลบ เนื่องจากหมู่คาร์บอกซิล (-COO⁻) หรือหมู่ฟอสเฟต (-PO₄³⁻) สามารถดูดซับสารกำจัดศัตรูพืชที่มีประจุบวกได้ดี ในทางกลับกันไบโอชาร์ที่มีประจุบวก เนื่องจากหมู่แอมโมเนียม (-NH₄⁺) สามารถดูดซับสารกำจัดศัตรูพืชที่มีประจุลบได้ ตัวอย่างของสารกำจัดศัตรูพืชที่ถูกดูดซับผ่านกลไกนี้ได้แก่ พาราควอต (Paraquat) ซึ่งมีประจุบวกและสามารถถูกดูดซับบนไบโอชาร์ที่มีหมู่คาร์บอกซิล และไกลโฟเสต (Glyphosate) ซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีประจุลบและสามารถเกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตกับไบโอชาร์ที่ผ่านการดัดแปลง ปัจจัยที่มีผลต่อแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตของไบโอชาร์ ได้แก่ ค่าความเป็นกรดต่างของสิ่งแวดล้อม ซึ่งส่งผลต่อการ

เปลี่ยนแปลงของประจุหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวไบโอชาร์ โดยที่ค่าความเป็นกรดต่างเป็นกรด ไบโอชาร์ จะมีประจุบวกมากขึ้น ส่งผลให้สามารถดูดซับสารกำจัดศัตรูพืชที่มีประจุลบได้ดีขึ้น ในขณะที่ pH เป็นด่าง ไบโอชาร์จะมีประจุลบมากขึ้น ทำให้สามารถดูดซับสารกำจัดศัตรูพืชที่มีประจุบวกได้ดีขึ้น (Cheng et al., 2022; Mandal et al., 2016)

ตารางที่ 2.5 ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพ และทางเคมี

ลักษณะความแตกต่าง	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
1. ค่าความร้อนการดูดซับ	ต่ำ (อยู่ในช่วง 20-40 กิโลจูลต่อโมล)	สูง (มากกว่า 80 กิโลจูลต่อโมล)
2. สภาพจำเพาะของการดูดซับ	ไม่เจาะจง (สารดูดซับหนึ่ง ๆ สามารถดูดซับสารได้หลายชนิด)	มีความเจาะจง (เลือกดูดซับสารเป็นบางชนิดขึ้นกับสภาพของเคมีพื้นผิว)
3. ลักษณะการดูดซับบนพื้นผิวของสารดูดซับสาร	เป็นแบบชั้นเดียวหรือหลายชั้น และไม่มีการแตกตัวของสารถูกดูดซับ	เป็นแบบชั้นเดียวเท่านั้น และอาจเกิดการแตกตัวของสารถูกดูดซับ
4. อุณหภูมิของการดูดซับ	ดูดซับได้ดีในช่วงอุณหภูมิต่ำ	ดูดซับได้ดีในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง
5. แรงดึงดูดของการดูดซับ	ไม่มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างสารดูดซับและสารถูกดูดซับ	มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างสารดูดซับและสารถูกดูดซับ
6. สภาพผันกลับได้	การดูดซับสามารถผันกลับได้ และมีพลังงานกระตุ้นของการดูดซับต่ำ	การดูดซับเป็นแบบไม่ผันกลับ และมีพลังงานกระตุ้นของการดูดซับสูง
7. อัตราเร็วของการดูดซับ	เร็วและถูกควบคุมโดยความต้านทานการถ่ายโอนมวลภายในรูพรุนของสารดูดซับ	ช้าและถูกควบคุมโดยขั้นตอนของปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิวภายในของสารดูดซับ

หมายเหตุ: ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย (2554)

2.4.2 สมการไอโซเทิร์มของการดูดซับ (Adsorption Isotherm Equations)

สมการไอโซเทิร์มของการดูดซับใช้ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ (Adsorbent) กับความเข้มข้นของสารในสารละลาย (Solution) ที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิที่คงที่ สำหรับสมการไอโซเทิร์มที่นิยมใช้กันทั่วไปในงานดูดซับ คือสมการ

แลงเมียร์ (Langmuir Isotherm) สมการฟรุนด์ลิช (Freundlich Isotherm) สมการเทมคิน (Temkin Isotherm) และสมการฮิลล์ (Hill Isotherm)

2.4.2.1 สมการแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm)

สมการแลงเมียร์ ใช้เพื่ออธิบายการดูดซับของสารลงบนตัวดูดซับ สมการนี้มีพื้นฐานมาจากสมมติฐานว่า การดูดซับเป็นแบบโมโนเลเยอร์ (monolayer) และเกิดขึ้นบนพื้นผิวที่มีตำแหน่งดูดซับที่เท่ากันทั้งหมด ต่อไปนี้เป็นรายละเอียดของสมการแลงเมียร์ อ้างอิงจาก LANGMUIR, I., (1918)

สมการแลงเมียร์

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (1)$$

สมการแลงเมียร์ สามารถแสดงได้ในรูปแบบดังนี้

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m \times K_L} + \frac{C_e}{q_m} \quad (2)$$

ตัวแปรในสมการแลงเมียร์

- C_e คือ ความเข้มข้นของสารในสารละลายที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร) หมายถึง ความเข้มข้นของสารที่ยังคงอยู่ในสารละลายเมื่อการดูดซับถึงสภาวะสมดุล
- q_e คือ ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม) ที่สมดุล หมายถึง จำนวนมวลของสารที่ถูกดูดซับต่อหน่วยมวลของตัวดูดซับเมื่อถึงสภาวะสมดุล
- q_m คือ ความจุสูงสุดของการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม) หมายถึง จำนวนมวลสูงสุดของสารที่สามารถถูกดูดซับได้ต่อหน่วยมวลของตัวดูดซับเมื่อทุกตำแหน่งบนพื้นผิวถูกยึดครองทั้งหมด เป็นค่าคงที่ที่ใช้บ่งบอกความสามารถสูงสุดในการดูดซับของตัวดูดซับ
- K_L คือ ค่าคงที่แลงเมียร์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

2.4.2.2 สมการฟรุนด์ลิช (Freundlich Isotherm)

สมการฟรุนด์ลิช ใช้เพื่ออธิบายการดูดซับของสารบนพื้นผิวของตัวดูดซับ โดยสมการฟรุนด์ลิชมีสมมติฐานที่แตกต่างจากสมการแลงเมียร์ ตรงที่ไม่จำกัดการดูดซับเป็นแบบโมโนเลเยอร์ (monolayer) และยอมรับว่าพื้นผิวของตัวดูดซับมีความหลากหลายของตำแหน่งดูดซับ อ้างอิงจาก Freundlich, H. M. F., (1906)

สมการฟรุนด์ลิช

$$q_e = K_f C_e^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

สมการฟรุนด์ลิช สามารถแสดงได้ในรูปแบบดังนี้

$$\log q_e = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e \quad (4)$$

ตัวแปรในสมการฟรุนด์ลิช

- q_e คือ ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม) ที่สมดุล
- C_e คือ ความเข้มข้นของสารในสารละลายที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)
- K_f คือ ค่าคงที่ฟรุนด์ลิช $\frac{mg}{g} \cdot \left(\frac{L}{g}\right)^{\frac{1}{n}}$ เป็นตัวบ่งบอกความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ

$\frac{1}{n}$ คือ ค่าคงที่ที่บ่งบอกถึงความเข้มข้นของการดูดซับ ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกความไม่เป็นเส้นตรงของการดูดซับ (ถ้า $n = 1$ แสดงว่าการดูดซับเป็นเส้นตรง)

2.4.2.3 สมการเทมคิน (Temkin Isotherm)

สมการเทมคิน (Temkin Isotherm) ใช้เพื่ออธิบายพฤติกรรมของการดูดซับที่ได้รับอิทธิพลจากพลังงานการดูดซับ และ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับและพื้นผิวของวัสดุดูดซับ โดยแตกต่างจาก Langmuir และ Freundlich ตรงที่สมมติฐานของแบบจำลองนี้ระบุว่า พลังงานการดูดซับจะลดลงเมื่อพื้นที่ดูดซับถูกเติมเต็ม โดยไอโซเทอมการดูดซับของเทมคินสามารถนำไปใช้ได้กับการดูดซับทางเคมีเนื่องจากในสมการจะพิจารณาถึงพลังงานการกระตุ้นของตัวดูดซับ อ้างอิงจาก Temkin & Pyzhev., (1940)

สมการเทมคิน

$$q_e = \frac{RT}{b} \ln (K_T C_e) \quad (5)$$

สมการเทมคิน สามารถแสดงได้ในรูปแบบดังนี้

$$q_e = B \ln C_e + B \ln K_T \quad (6)$$

ตัวแปรในสมการเทมคิน

- R คือ ค่าคงที่แก๊ส (8.314 จูลต่อโมลต่อเคลวิน)
- T คือ อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน
- b คือ ค่าพลังงานที่เกี่ยวข้องกับความร้อนของการดูดซับ (จูลต่อโมล)
- K_T คือ ค่าคงที่เทมคิน (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

2.4.2.4 สมการฮิลล์ (Hill Isotherm)

สมการฮิลล์ เป็นสมการที่อธิบายการดูดซับที่มีผลกระทบจากการจับตัวเป็นกลุ่ม (Cooperative Adsorption) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลที่ถูกดูดซับส่งผลต่อความน่าจะเป็นของโมเลกุลอื่นในการถูกดูดซับเพิ่มเติม โมเดลนี้มีการใช้งานอย่างกว้างขวางในระบบชีวเคมี เช่น การจับกันของโปรตีนกับลิแกนด์ และสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการดูดซับที่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ หรือสารที่มีผลต่อกันบนพื้นผิวตัวดูดซับ อ้างอิงโดย Hill, A. V., (1910)

สมการฮิลล์

$$q_e = \frac{Q_m C_e^n}{K_H + C_e^n} \quad (7)$$

สมการฮิลล์สามารถแสดงได้ในรูปแบบดังนี้

$$\log\left(\frac{q_e}{Q_m - q_e}\right) = n \log C_e - \log K_H \quad (8)$$

ตัวแปรในสมการฮิลล์

- q_e คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
- C_e คือ ความเข้มข้นของสารที่สมดุลในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
- Q_m คือ ความสามารถในการดูดซับสูงสุด (มิลลิกรัมต่อกรัม)
- K_H คือ ค่าคงที่ของฮิลล์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม) ซึ่งเกี่ยวข้องกับพลังงานการดูดซับ
- n คือ สัมประสิทธิ์ของฮิลล์ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกถึงลักษณะของการทำงานร่วมกับของโมเลกุลที่ถูกดูดซับ

2.4.3 จลนพลศาสตร์การดูดซับ (Adsorption Kinetics)

จลนพลศาสตร์การดูดซับ เป็นการศึกษาอัตราและกลไกที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการดูดซับของสารละลายหรือสารแขวนลอยลงบนพื้นผิวของตัวดูดซับ โดยเน้นถึงเวลาที่ใช้ในการดูดซับ รวมถึงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณการดูดซับเมื่อเวลาผ่านไป ในงานวิจัยด้านการดูดซับมักจะใช้แบบจำลองจลนพลศาสตร์เพื่ออธิบายอัตราการดูดซับ โดยแบบจำลองที่ใช้ เช่น แบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-First Order Kinetics) แบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม (Pseudo-Second Order Kinetics)

2.4.3.1 แบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-First Order Kinetics)

เป็นแบบจำลองที่ใช้อธิบายกระบวนการดูดซับที่อัตราการดูดซับขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายเพียงตัวเดียว หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของการดูดซับเป็นสัดส่วนกับปริมาณของสารที่ถูกดูดซับไว้ในสถานะสมดุล อ้างอิงโดย Lagergren, S., (1898) สมการจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียมสามารถแสดงได้ดังนี้:

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

ตัวแปรในสมการจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม

- q_e คือ ปริมาณการดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
- q_t คือ ปริมาณการดูดซับ ณ เวลาที่ t (มิลลิกรัมต่อกรัม)
- k_1 คือ ค่าคงที่ของจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง (min^{-1})
- t คือ เวลา (นาท)

ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ เช่น การบำบัดน้ำเสีย การกำจัดโลหะหนัก และการดูดซับสารอินทรีย์ แบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียมถูกใช้บ่อยในกรณีที่มีการดูดซับเกิดขึ้นโดยกระบวนการทางกายภาพ ซึ่งแรงที่เกี่ยวข้องไม่รุนแรง เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ หรือการยึดเหนี่ยวทางโมเลกุล การทำนายพฤติกรรมของการดูดซับโดยใช้สมการนี้เป็นวิธีที่ง่ายและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างกว้างขวาง อย่างไรก็ตาม การใช้แบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียมมักจะมี ความแม่นยำต่ำกว่าจลนพลศาสตร์อันดับสองในบางกรณีโดยเฉพาะในระบบที่เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวดูดซับและสารที่ถูกดูดซับ

จากการศึกษา Lagergren, S. (1898) พบว่างานวิจัยนี้นำเสนอสมการแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียมเพื่อใช้ในการอธิบายการดูดซับของสารละลายในตัวดูดซับ การศึกษานี้เป็นการพัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายการดูดซับในระบบกายภาพ โดยอ้างอิงจากการเปลี่ยนแปลงของสารที่ถูกดูดซับในช่วงเวลาหนึ่ง

2.4.3.2 แบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม (Pseudo-Second Order Kinetics)

เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการอธิบายกระบวนการดูดซับที่เกิดจากการยึดเหนี่ยวทางเคมี ระหว่างตัวดูดซับและสารที่ถูกดูดซับ โดยสมมติว่าอัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนกับจำนวนตำแหน่งว่างที่ยังไม่ได้ถูกครอบครองแบบยกกำลังสอง อ้างอิงโดย Ho, Y. S., & McKay, G. (1999)

สมการจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียมแสดงได้ดังนี้:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (10)$$

ตัวแปรในสมการจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม

- q_e คือ ปริมาณการดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 q_t คือ ปริมาณการดูดซับ ณ เวลาที่ t (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 k_2 คือ ค่าคงที่ของจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม (มิลลิกรัมต่อกรัมต่อนาที)
 t คือ เวลา (นาที)

แบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ โดยเฉพาะในกรณีที่มีการดูดซับเกิดจากการยึดเหนี่ยวทางเคมี เช่น การกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียหรือการดูดซับสารอินทรีย์ที่มีปฏิสัมพันธ์ทางเคมีกับตัวดูดซับ การทำนายพฤติกรรมของการดูดซับด้วยแบบจำลองนี้มีความแม่นยำสูงกว่าจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง โดยเฉพาะในกรณีที่มีการดูดซับเกิดขึ้นช้าและมีความสัมพันธ์กับการเกิดพันธะเคมี นอกจากนี้แบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียมยังใช้ในการศึกษาขั้นตอนการแพร่ของสารเข้าสู่ภายในอนุภาคของตัวดูดซับด้วย

จากการศึกษา Ho, Y. S., & McKay, G. (1999) พบว่างานวิจัยนี้นำเสนอสมการแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม และแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนี้สามารถอธิบายกระบวนการดูดซับหลายระบบ โดยเฉพาะในกรณีที่มีการดูดซับเกิดจากปฏิสัมพันธ์ทางเคมี ตัวอย่างเช่น การดูดซับของโลหะหนักและสารอินทรีย์บนตัวดูดซับธรรมชาติหรือถ่านกัมมันต์ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนี้สามารถทำนายการดูดซับในช่วงเวลาต่าง ๆ ได้อย่างแม่นยำ

2.5 ไบโอชาร์ (Biochar)

ไบโอชาร์ คือวัสดุที่อุดมด้วยคาร์บอน ซึ่งผลิตจากชีวมวลหรือวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร เช่น ใบไม้ เปลือกทุเรียน ฟางข้าว ชังข้าวโพด และเหง้ามันสำปะหลัง เป็นต้น โดยเป็นการนำชีวมวลมาผ่านกระบวนการเผาไหม้ที่มีการควบคุมอุณหภูมิและอากาศหรือจำกัดอากาศให้เข้าไปเผาไหม้น้อยที่สุด ซึ่งกระบวนการเผาไหม้ี้เรียกว่า กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) เมื่อผ่านกระบวนการนี้จะทำให้เกิดเป็นคาร์บอนที่มีโครงสร้างอะโรมาติก มีรูพรุน และมีหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว ซึ่งไบโอชาร์มีคุณสมบัติพิเศษในการช่วยปรับปรุงคุณภาพดิน เพิ่มความสามารถในการเก็บน้ำและสารอาหารในดิน ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และมีความสามารถในการใช้เป็นวัสดุดูดซับสารพิษจากสิ่งแวดล้อม (Lehmann, J., & Joseph, S., 2009)

2.5.1 คุณสมบัติของไบโอชาร์

ไบโอชาร์จะมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ โดยน้ำหนักสูงกว่าธาตุชนิดอื่น เนื่องจากไม่ได้สัมผัสกับออกซิเจนในกระบวนการสังเคราะห์ โดยไบโอชาร์ประกอบไปด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และซิลเฟอร์ แต่ละองค์ประกอบจะเปลี่ยนไปตามชนิดของชีวมวลที่นำมาสังเคราะห์และปัจจัยในกระบวนการสังเคราะห์ เช่น อุณหภูมิ และระยะเวลา ดังนั้นเมื่อนำไบโอชาร์

มาในการปรับปรุงดิน ไบโอชาร์จะสามารถดูดซับธาตุอาหารที่มีประจุบวกได้ดีเนื่องจากตัวไบโอชาร์เป็นประจุลบ ส่งผลให้พืชเติบโตได้ดีเนื่องจากดินมีความอุดมสมบูรณ์มากขึ้น (พินิจภณ, 2557)

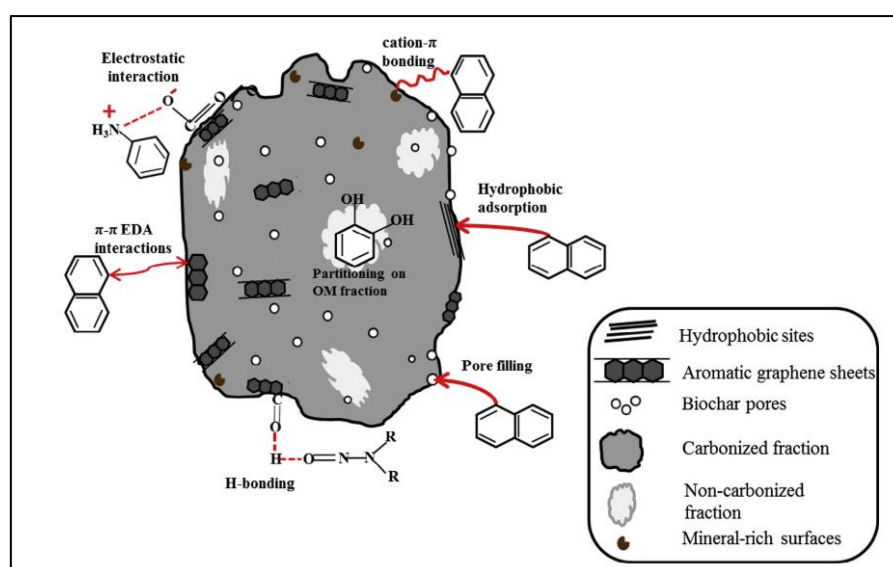
ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติของไบโอชาร์

ไบโอชาร์	คุณสมบัติ
องค์ประกอบของธาตุ	คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์
ความคงตัว	สลายตัวช้ามีอายุการใช้งานยาว
พื้นที่ผิวและรูพรุน	ช่วยดูดซับธาตุอาหารไว้บนพื้นผิวทั้งภายนอกและภายในรูพรุนได้

หมายเหตุ : (พินิจภณ, 2557)

2.5.2 กลไกการดูดซับสารปนเปื้อนของไบโอชาร์

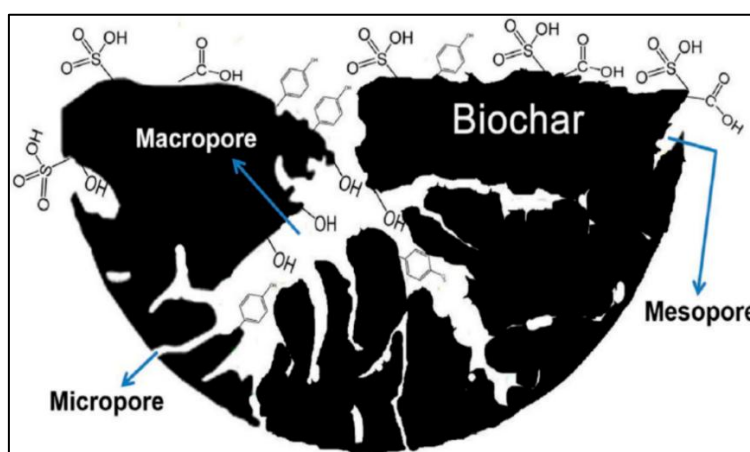
คุณสมบัติในการดูดซับสารปนเปื้อนของไบโอชาร์ ได้แก่ การเติมรูพรุน (Pore Filling) การแบ่งส่วน (Partitioning) ความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobicity) ปฏิกริยาทางอะโรมาติก และปฏิกริยาระหว่างแคตไอออนกับ π (Aromatic- and cation- π interactions) ปฏิกริยาระหว่างไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Interactions) และพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bonding) (Inyang, M., & Dickenson, E., 2015)



รูปที่ 2.2 ลักษณะกลไกการดูดซับสารปนเปื้อนของไบโอชาร์ (Inyang & Dickenson, 2015)

2.5.2.1 การเติมรูพรุน

การเติมรูพรุน หมายถึง การดูดซับของไบโอชาร์ที่เกี่ยวข้องกับการเติมเต็มรูพรุนของไบโอชาร์ โดยไบโอชาร์จะมีโครงสร้างรูพรุนที่ซับซ้อนและมีพื้นที่ผิว โดยรูพรุนของไบโอชาร์จะประกอบไปด้วยรูพรุน 3 ขนาด ได้แก่ รูพรุนขนาดเล็กมีขนาดน้อยกว่า 2 นาโนเมตร รูพรุนขนาดกลางมีขนาดอยู่ในช่วง 2 ถึง 50 นาโนเมตร รูพรุนขนาดใหญ่ มีขนาดมากกว่า 50 นาโนเมตร (Cheng & Li., 2018) ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับสารปนเปื้อนเมื่อสารปนเปื้อนในน้ำผ่านเข้าไปในรูพรุนของไบโอชาร์ พื้นที่ผิวภายในรูพรุนจะทำให้สารปนเปื้อนถูกดูดซับติดอยู่ในรูพรุน โดยเฉพาะสารโมเลกุลขนาดเล็กที่สามารถเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุนได้ง่าย กลไกนี้จะช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับสารเคมีและสารอินทรีย์ต่าง ๆ ในการบำบัดน้ำ เช่น สารกำจัดศัตรูพืช สีย้อม และสารเคมีอื่น ๆ เป็นต้น (Inyang & Dickenson, 2015)



รูปที่ 2.3 ชนิดของรูพรุนไบโอชาร์ (Cheng & Li., 2018)

2.5.2.2 การแพร่กระจาย และการแบ่งส่วน

การแพร่กระจายและการแบ่งส่วน หมายถึง กระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนโดย การแพร่กระจาย (Diffusion) เป็นกระบวนการเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำผ่านพื้นที่ผิวและภายในรูพรุนของไบโอชาร์ ความสามารถในการแพร่กระจายขึ้นอยู่กับขนาดรูพรุนและความสามารถของไบโอชาร์ในการดูดซับสารปนเปื้อนเหล่านั้น เมื่อสารปนเปื้อนเข้าสู่รูพรุนของไบโอชาร์ มันจะถูกดักจับและกักเก็บไว้ในโครงสร้างของไบโอชาร์นี้ และการแบ่งส่วน (Partitioning) เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อสารปนเปื้อนมีการกระจายตัวระหว่างเฟสของไบโอชาร์ และน้ำ การแบ่งส่วนนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของไบโอชาร์และสารปนเปื้อน ไบโอชาร์ที่มีโครงสร้างรูพรุนที่ซับซ้อนสามารถดูดซับสารปนเปื้อนที่มีความเข้ากันได้ดี ทำให้การแบ่งส่วนของสารปนเปื้อนเข้าสู่ไบโอชาร์มีประสิทธิภาพมากขึ้น (Inyang & Dickenson, 2015)

2.5.2.3 ความไม่ชอบน้ำ

ความไม่ชอบน้ำ หมายถึง การปฏิสัมพันธ์แบบไฮโดรโฟบิกเป็นการที่ไบโอซาร์ดูดซับสารปนเปื้อนที่ไม่ละลายในน้ำหรือมีความชอบน้ำต่ำ เช่น สารอินทรีย์ต่าง ๆ โดยโครงสร้างคาร์บอนในไบโอซาร์ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นไฮโดรโฟบิกจะดึงดูด และกักเก็บสารเหล่านี้เอาไว้บนพื้นผิวหรือในรูพรุนของไบโอซาร์ กระบวนการนี้มีบทบาทสำคัญในการกำจัดสารมลพิษอินทรีย์ที่ละลายในน้ำได้ยาก เช่น การดูดซับของสารเพอร์ฟลูออโรออกเทนซัลโฟเนต (Perfluorooctane Sulfonate) ถูกดูดซับโดยปฏิกิริยาที่ไม่ชอบน้ำระหว่างสาย C-F และที่ไม่ชอบน้ำบนไบโอซาร์จากฟางข้าวโพด และไบโอซาร์จากต้นวิลโลว์ (Chen, Xi, et al., 2011)

2.5.2.4 ปฏิสัมพันธ์ทางอะโรมาติกและปฏิกิริยาระหว่างแคตไอออนกับ π (Aromatic and Cation- π Interactions)

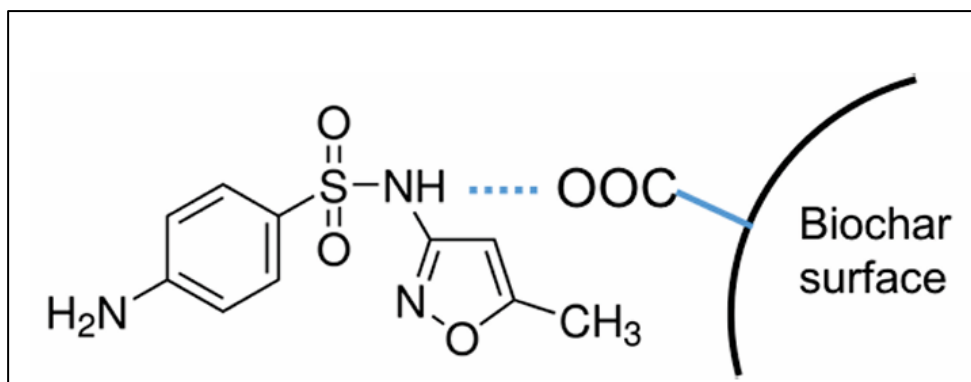
ปฏิสัมพันธ์ทางอะโรมาติกและปฏิกิริยาระหว่างแคตไอออนกับ π หมายถึง การให้และการรับอิเล็กตรอนที่ไม่ใช่พันธะโคเวเลนต์ แต่เป็นการมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างอะโรมาติกของสารปนเปื้อนกับโครงสร้างคาร์บอนของไบโอซาร์ สารปนเปื้อนที่มีวงแหวนอะโรมาติกจะถูกดึงดูดและกักเก็บไว้บนพื้นผิวของไบโอซาร์ ส่วนปฏิกิริยาระหว่างแคตไอออนกับ π เป็นปฏิสัมพันธ์ระหว่างไอออนบวกกับวงแหวนอะโรมาติกของไบโอซาร์ เช่น การมีปฏิสัมพันธ์ในการดูดซับของอะทราซีนกับไบโอซาร์ มีสาเหตุมาจากปฏิกิริยาระหว่าง π - π ระหว่างสารองค์ประกอบของคลอรีนที่ดึงอิเล็กตรอนในอะทราซีนและอะโรมาติกคาร์บอนบนพื้นผิวของถ่านไบโอซาร์

2.5.2.5 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างไฟฟ้าสถิต

ปฏิสัมพันธ์ระหว่างไฟฟ้าสถิตหมายถึง แรงดึงดูดระหว่างประจุบวกและประจุลบในสารปนเปื้อนและพื้นผิวของไบโอซาร์เป็นกลไกหลักในการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ที่เป็นไอออนิกและไอออนไนซ์ได้ ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อปฏิกิริยานี้ คือค่าความเป็นกรดและความเข้มข้นของไอออนในสารละลาย เมื่อ pH น้อยกว่า pH_{PZC} ประจุบนพื้นผิวไบโอซาร์จะมีประจุเป็นบวก และสามารถดึงดูดสารที่มีประจุลบได้ แต่เมื่อ pH มากกว่า pH_{PZC} ประจุบนพื้นผิวไบโอซาร์จะมีประจุลบ และสามารถดึงดูดสารที่มีประจุบวกได้ ปฏิสัมพันธ์นี้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับสารอินทรีย์และสารเคมีต่าง ๆ จากน้ำโดยปฏิสัมพันธ์นี้มีความแข็งแรงมากกว่าปฏิกิริยาแบบพันธะไฮโดรเจน ทำให้ไบโอซาร์สามารถกักเก็บสารมลพิษได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นในกระบวนการบำบัดน้ำ (Mukherjee et al., 2011)

2.5.2.6 พันธะไฮโดรเจน

พันธะไฮโดรเจน หมายถึง การดูดซับสารประกอบอินทรีย์เชิงขั้วบนไบโอซาร์เป็นปฏิสัมพันธ์ทางเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมไฮโดรเจนที่ผูกกับอะตอมที่มีอิเล็กตรอนมาก เช่น ออกซิเจน (O) ไนโตรเจน (N) หรือฟลูออรีน (F) กับอะตอมที่มีอิเล็กตรอนมากอื่น ๆ ที่อยู่ใกล้เคียง ไบโอซาร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนจะสามารถจับกับสารปนเปื้อนที่มีหมู่ฟังก์ชันที่เข้ากันได้ เช่น $-COOH$ $-OH$ $-NH_2$ เป็นต้น จากรูปที่ 2.3 แสดงถึงกลไกการดูดซับโดยพันธะไฮโดรเจนของสารซัลฟาเมโทซาล (sulfamethoxazole) และหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล ($-COOH$) บนพื้นผิวของไบโอซาร์



รูปที่ 2.3 กลไกการดูดซับโดยพันธะไฮโดรเจน (Tong et al., 2019)

2.5.3 การใช้ไบโอชาร์ในด้านสิ่งแวดล้อม

ไบโอชาร์เป็นวัสดุที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสของชีวมวลภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนต่ำ ซึ่งไบโอชาร์ได้รับความสนใจในงานด้านสิ่งแวดล้อม เนื่องจากมีคุณสมบัติที่เป็นประโยชน์ เช่น พื้นที่ผิวสูง โครงสร้างรูพรุน ความสามารถในการดูดซับมลพิษ และมีความเสถียรภาพในสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ยังเป็นวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและสามารถช่วยลดปัญหามลพิษทางดิน น้ำ และอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Zhang et al., 2018)

2.5.3.1 การใช้ไบโอชาร์เป็นวัสดุในการดูดซับมลพิษในดิน

ไบโอชาร์มีบทบาทสำคัญในการปรับปรุงคุณภาพดินในหลายด้าน เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติในการดูดซับสารมลพิษ กักเก็บธาตุอาหาร และปรับปรุงโครงสร้างทางกายภาพของดิน การเติมไบโอชาร์ลงในดินสามารถช่วยลดการปนเปื้อนของโลหะหนักและสารเคมีอันตรายได้ โดยการตรึงและลดความเป็นพิษของสารเหล่านี้ นอกจากนี้ Khorram et al., 2016 ศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพของไบโอชาร์ในการดูดซับสารกำจัดศัตรูพืช ระบุว่า การเติมไบโอชาร์ลงในดินช่วยลดความสามารถของพืชในการดูดซับสารกำจัดศัตรูพืช เนื่องจากโมเลกุลของสารกำจัดศัตรูพืชที่ถูกดูดซับโดยไบโอชาร์จะไม่สามารถเข้าสู่สารละลายในดินได้ ทำให้สารกำจัดศัตรูพืชเหล่านี้มีความเป็นพิษต่อพืชและสิ่งมีชีวิตในดินลดลง และในปีถัดมา Gámiz et al., 2017 มีการศึกษาประสิทธิภาพของไบโอชาร์ที่สังเคราะห์จาก ฮิคคอร์รี่ม็อคเกอร์นัท (*Carya tomentosa*) และพีแคน (*Carya illinoensis*) ในการดูดซับสารกำจัดศัตรูพืช โคลมาโซน (Clomazone) และ บิสไพริแบค-โซเดียม (Bispyribac Sodium) ในดิน โดยผลการศึกษพบว่าไบโอชาร์ที่ผลิตที่ 700 องศาเซลเซียส มีการดูดซับสารกำจัดศัตรูพืชสูงสุดและส่งผลให้บิสไพริแบค-โซเดียมคงอยู่ในดินนานขึ้นถึง 3 เท่า เมื่อเทียบกับดินที่ไม่มีไบโอชาร์ ซึ่งหมายความว่าไบโอชาร์สามารถนำไปใช้เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารเคมีในแหล่งน้ำใต้ดิน และลดผลกระทบต่อระบบนิเวศได้ ในทางปฏิบัติไบโอชาร์อาจถูกนำมาใช้ร่วมกับมาตรการทางการเกษตร เช่น การเติมลงในดินของพื้นที่เพาะปลูกเพื่อป้องกันการสะสมของสารกำจัดศัตรูพืชในดินและแหล่งน้ำ

2.5.3.2 การใช้ไบโอชาร์เป็นวัสดุในการดูดซับมลพิษในน้ำ

ไบโอชาร์ได้รับความสนใจสำหรับวัสดุดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารปนเปื้อนในน้ำ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสูง โครงสร้างรูพรุน และหมู่ฟังก์ชันทางเคมีที่สามารถจับกับมลพิษได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการบำบัดน้ำเสียจากภาคอุตสาหกรรม และภาคเกษตรกรรม ไบโอชาร์สามารถใช้กำจัดสารปนเปื้อนหลายประเภท เช่น สารกำจัดศัตรูพืช สารอินทรีย์ตกค้าง สารมลพิษที่มีความคงตัวสูง และโลหะหนัก ซึ่งเป็นสารมลพิษที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์ ในบรรดาสารมลพิษเหล่านี้ สารกำจัดศัตรูพืชและสารเคมีจากภาคอุตสาหกรรมถือเป็นกลุ่มที่ไบโอชาร์สามารถดูดซับได้อย่างมีประสิทธิภาพ สารเหล่านี้มักปนเปื้อนในน้ำจากการใช้งานทางเกษตรกรรม และสามารถสะสมในแหล่งน้ำได้นาน ไบโอชาร์สามารถตรึงสารเหล่านี้ได้ผ่านกระบวนการดูดซับทั้งทางกายภาพและทางเคมี โดยมีกลไกหลัก ได้แก่ π - π Interactions พันธะไฮโดรเจน และแรงระหว่างประจุไฟฟ้าสถิต ซึ่งช่วยลดความเป็นพิษและการแพร่กระจายของสารในแหล่งน้ำ นอกจากนี้ ไบโอชาร์ยังสามารถลดการปนเปื้อนของสารเหล่านี้ในน้ำและช่วยป้องกันการดูดซึมเข้าสู่สิ่งมีชีวิตในระบบนิเวศทางน้ำ ซึ่งงานวิจัยของ Cosgrove Et Al., 2019 ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของสารกำจัดศัตรูพืชต่อคุณภาพของแหล่งน้ำดื่ม โดยเน้นประเด็นไปที่ผลกระทบของสารกำจัดศัตรูพืชที่มีขั้วและสามารถแพร่กระจายได้ง่าย เช่น เมทิลดีไฮด์ ซึ่งพบในเมืองเวลส์ ประเทศอังกฤษ โดยการศึกษาเน้นถึงความสำคัญของการใช้วัสดุดูดซับ ไบโอชาร์ในพื้นที่เกษตรกรรม เพื่อช่วยลดการแพร่กระจายของสารกำจัดศัตรูพืชก่อนที่มันจะเข้าสู่แหล่งน้ำดื่ม และจากงานวิจัย Alsherbeny Et Al., 2022 ศึกษากระบวนการดูดซับสารกำจัดศัตรูพืช 10 ชนิด ได้แก่ อาหาราซิน คลอร์เฟนิวินฟอส คลอร์ไพริฟอส ไซโปรดีนิล ไดอะซินอน ไดเมโทเอต ไดยูรอน เอโทอน มาลาไทอน และโพรเพโนฟอส ด้วยไบโอชาร์จากซังข้าวโพดที่ไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส โดยเน้นประเด็นไปที่สมมูลของการดูดซับ และจลนศาสตร์ของการดูดซับ โดยเฉพาะเมื่อใช้ไบโอชาร์ในน้ำที่มีสถานะที่มีค่าความเป็นกรดอ่อน และมีการใช้ปริมาณไบโอชาร์ที่เหมาะสม จะส่งผลให้กระบวนการดูดซับจะเป็นไปตามแลงเมียร์ไอโซเทิร์ม และแบบจำลองอันดับหนึ่งเทียม ซึ่งบ่งชี้ถึงศักยภาพของไบโอชาร์จากซังข้าวโพดในการดูดซับสารกำจัดศัตรูพืชจากน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้สารกำจัดศัตรูพืชที่มีค่า K_{ow} สูง หรือมีคุณสมบัติเป็นสารที่ไม่ชอบน้ำ เช่น คลอร์เฟนิวินฟอส คลอร์ไพริฟอส ไซโปรดีนิล ไดอะซินอน ไดยูรอน เอโทอน และโพรเพโนฟอส มีแนวโน้มถูกดูดซับได้ดีบนไบโอชาร์ ในทางตรงกันข้าม สารกำจัดศัตรูพืชที่มีขั้วสูงเช่น อาหาราซิน ไดเมโทเอต และมาลาไทอน กลับมีอัตราการดูดซับต่ำกว่า และต้องใช้ระยะเวลาเพิ่มขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำสามารถแข่งขันกับโมเลกุลของสารเหล่านี้ในการจับกับหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วบนพื้นผิวของไบโอชาร์ ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง

2.6 กระบวนการสังเคราะห์ไบโอชาร์

การสังเคราะห์ไบโอชาร์เป็นกระบวนการเปลี่ยนวัสดุชีวมวลให้กลายเป็นของแข็งที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งมีคุณสมบัติเฉพาะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับสารมลพิษในน้ำและดิน ได้แก่ พื้นที่ผิวจำเพาะ โครงสร้างรูพรุน และหมู่ฟังก์ชันทางเคมีบนพื้นผิว การเลือกวัสดุตั้งต้นมีผลโดยตรงต่อคุณสมบัติของไบโอชาร์ โดยปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อคุณภาพของไบโอชาร์ ได้แก่ อุณหภูมิของกระบวนการ เวลาในการให้ความร้อน และชนิดของบรรยากาศที่ใช้ เช่น ไนโตรเจน หรือสภาวะ

ไม่ใช้ออกซิเจน หนึ่งในเทคนิคหลักที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์ไบโอชาร์คือ กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) ซึ่งเป็นกระบวนการทางเคมีที่นำชีวมวลมาผ่านความร้อนในสภาวะที่มีออกซิเจนน้อยหรือไม่มีเลย โดยการไพโรไลซิสจะทำให้สารอินทรีย์ในชีวมวลแตกตัวออกเป็นผลิตภัณฑ์หลักสามชนิด ได้แก่ ไบโอชาร์ (Biochar) น้ำมันชีวภาพ (Bio-Oil) และก๊าซสังเคราะห์ (Syngas) ซึ่งไบโอชาร์ส่วนใหญ่จะเป็นประกอบไปด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากผ่านกระบวนการไพโรไลซิส และการไพโรไลซิสจะแบ่งออกเป็นการไพโรไลซิสแบบช้า (Slow Pyrolysis) และไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast Pyrolysis) ซึ่งชนิดของการไพโรไลซิสจะให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากผ่านกระบวนการที่แตกต่างกันออกไป (Varjani, S., Kumar, G., & Rene, E. R., 2019).

2.6.1 ไพโรไลซิสแบบช้า (Slow pyrolysis)

ไพโรไลซิสแบบช้าเป็นกระบวนการไพโรไลซิสที่มีการทำปฏิกิริยาในอุณหภูมิระหว่าง 100 ถึง 1000 องศาเซลเซียส มีอัตราการให้ความร้อนต่ำประมาณ 5 ถึง 7 องศาเซลเซียสต่อนาที และให้ความร้อนกับชีวมวลอย่างช้า ๆ ใช้เวลาหลายชั่วโมง ตั้งแต่ 1 ถึง 24 ชั่วโมง ผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิสแบบช้ามีสัดส่วนเป็นไบโอชาร์ 30 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ น้ำมันชีวภาพ และก๊าซสังเคราะห์ ในปริมาณน้อยกว่า และมักมีการจำกัดออกซิเจนเพื่อไม่ให้เกิดการลุกไหม้แปรสภาพเป็นถ่าน สารชีวมวลจะเกิดการแตกสลายเชิงความร้อน ให้สารที่ระเหยได้ออกไปจนกระทั่งได้ผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ไม่เผาไหม้ และมีคาร์บอนคงตัวในปริมาณที่สูง ดังตารางที่ 2.7

2.6.2 ไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast pyrolysis)

ไพโรไลซิสแบบเร็ว เป็นกระบวนการไพโรไลซิสที่มีการทำปฏิกิริยาในอุณหภูมิระหว่าง 300 ถึง 10000 องศาเซลเซียส มีอัตราการให้ความร้อนสูงประมาณ 300 ถึง 800 องศาเซลเซียสต่อนาที และให้ความร้อนกับชีวมวลอย่างรวดเร็ว โดยใช้เวลาในหน่วยวินาทีถึงนาที ประมาณ 0.5 ถึง 10 วินาที ผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิสแบบเร็วมีสัดส่วนเป็นน้ำมันชีวภาพ 15 ถึง 35 เปอร์เซ็นต์ ก๊าซสังเคราะห์ และไบโอชาร์ ในปริมาณน้อยกว่า ซึ่งสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงเหลวหรือวัตถุดิบในกระบวนการผลิตเคมีภัณฑ์ นอกจากนี้ยังมีการจำกัดออกซิเจนเพื่อไม่ให้เกิดการลุกไหม้แปรสภาพเป็นถ่านอีกด้วย ดังตารางที่ 2.7

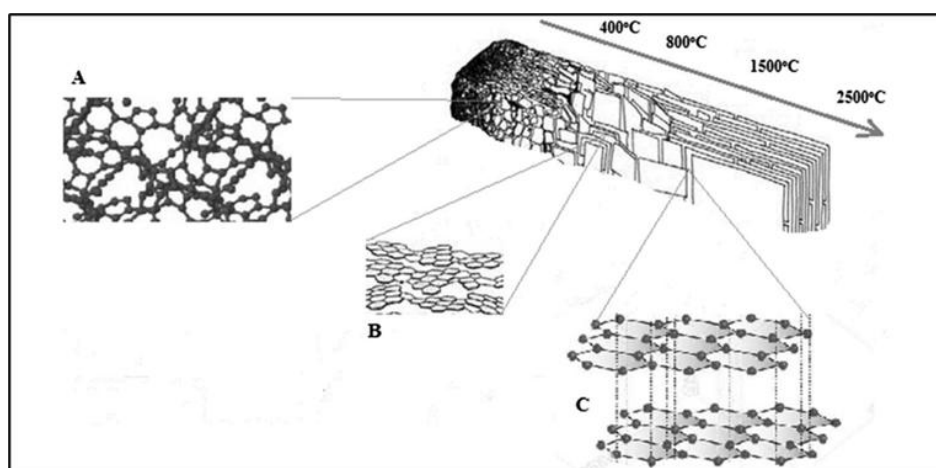
ตารางที่ 2.7 ประเภทของการไพโรไลซิส

ประเภทของลักษณะ	ประเภทของการไพโรไลซิส	
	ไพโรไลซิสแบบช้า	ไพโรไลซิสแบบเร็ว
1. อัตราการทำความร้อน(องศาเซลเซียสต่อนาที)	5-7	300-800
2. อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	100-1000	300-1000
3. ระยะเวลา	>1 ชั่วโมง	0.5-10 วินาที
4. ผลิตภัณฑ์หลัก	ไบโอชาร์	น้ำมันชีวภาพ
5. ผลผลิตถ่านไบโอชาร์ (wt %)	35-50	15-35

หมายเหตุ : (VARJANI, S., et al., 2019)

2.6.3 ผลกระทบของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อคุณสมบัติของไบโอชาร์

ผลกระทบของอุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิสตั้งแต่อุณหภูมิห้องถึง 200 องศาเซลเซียส จะส่งผลให้เกิดการระเหยของน้ำและสารระเหยต่าง ๆ ซึ่งการระเหยของน้ำจะทำให้เกิดการแตกของพันธะ และเกิดการสร้างกลุ่ม ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ $-COOH$ (คาร์บอกซิล) และ $-CO$ (คาร์บอนิล) บนพื้นผิวของไบโอชาร์ จากนั้นเมื่ออุณหภูมิ 200 จนถึง 500 องศาเซลเซียส จะเกิดการสลายตัวอย่างรวดเร็วของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลส นอกจากนี้ยังช่วยให้กลุ่มคาร์บอนเปลี่ยนแปลงเป็นโครงสร้างอะโรมาติก และเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส จะส่งผลให้เกิดการสลายตัวของลิกนินและสารอินทรีย์อื่น ๆ ส่งผลต่อโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันของไบโอชาร์ ซึ่งจะทำให้ไบโอชาร์มีลักษณะทางโครงสร้างที่มีความเสถียรสูงและมีชั้นคาร์บอนเรียงตัวเป็นระเบียบมากขึ้น แต่จะมีกลุ่มฟังก์ชันที่ลดลงเนื่องจากการสลายตัวของลิกนิน (Tomczyk et al., 2020)



รูปที่ 2.4 ผลกระทบของอุณหภูมิในการไพโรไลซิสต่อโครงสร้างของไบโอชาร์ (Tomczyk et al., 2020)

2.7 เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของไบโอชาร์ (Biochar Yield %)

เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของไบโอชาร์เป็นค่าที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการไพโรไลซิส โดยแสดงถึงสัดส่วนของไบโอชาร์ที่ได้รับหลังจากการเผาไหม้แบบไร้ออกซิเจน เมื่อเปรียบเทียบกับมวลเริ่มต้นของชีวมวลที่ใช้ สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของไบโอชาร์} = \left(\frac{\text{มวลของไบโอชาร์ที่ได้ (กรัม)}}{\text{มวลของชีวมวลเริ่มต้น}} \right) \times 100\%$$

ค่าที่ได้เป็นเปอร์เซ็นต์ของชีวมวลที่ถูกเปลี่ยนเป็นไบโอชาร์หลังจากผ่านกระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งเป็นตัวชี้วัดที่สำคัญในการออกแบบและปรับปรุงกระบวนการผลิตไบโอชาร์ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด (Sun et al., 2017)

2.8 คุณสมบัติของเหง้ามันสำปะหลัง

เหง้ามันสำปะหลังเป็นส่วนที่อยู่เหนือรากของลำต้นมันสำปะหลัง เป็นส่วนที่แข็งของต้นมันสำปะหลัง และส่วนใหญ่กลายเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร แต่เมื่อนำมาวิเคราะห์ พบว่ามีคุณสมบัติที่จะนำมาผลิตเป็นไบโอชาร์ได้ ดังแสดงในตารางที่ 2.8 ซึ่งระบุคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของเหง้ามันสำปะหลัง เช่น ความชื้น (Moisture Content) ปริมาณสารอินทรีย์ (Organic Matter) ปริมาณเถ้า (Ash Content) ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) และระบุคุณสมบัติเกี่ยวกับองค์ประกอบทางเคมีของเหง้ามันสำปะหลัง เช่น ปริมาณคาร์บอน (Carbon) ไฮโดรเจน (Hydrogen) ไนโตรเจน (Nitrogen) และออกซิเจน (Oxygen) ซึ่งปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) บ่งบอกถึงปริมาณคาร์บอนที่คงเหลือในวัสดุหลังจากที่น้ำ สารระเหย (Volatile Matter) และเถ้า (Ash) ถูกกำจัดออกไปผ่านกระบวนการไพโรไลซิส ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) แสดงถึงปริมาณคาร์บอนที่มีอยู่ในวัสดุซึ่งสามารถทำหน้าที่เป็นแหล่งพลังงานหลักในกระบวนการเผาไหม้หรือการผลิตไบโอชาร์ได้ (Shariff et al., 2016) นอกจากนี้ชีวมวลที่มีสัดส่วนของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินที่เหมาะสมจะส่งผลต่อโครงสร้างและคุณสมบัติของไบโอชาร์ โดยเฉพาะลิกนินที่สูงจะเพิ่มปริมาณคาร์บอนและความเสถียรของไบโอชาร์ (Mukherjee et al., 2022)

ตารางที่ 2.8 คุณสมบัติของเหง้ามันสำปะหลัง

Proximate analysis (% w/w, as received basis)	
Moisture	10.6
Volatile matter	70.7
Fixed carbon	13.5
Ash	5.2
Ultimate analysis (% w/w, dry basis)	
C	43.1
H	6.0
N	0.8
O	44.2

หมายเหตุ : Tippayawong, Rerkkriangkrai, Aggarangsi, & Pattiya, 2017

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.9.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ไบโอชาร์จากชีวมวล

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า พบว่าชนิดของชีวมวลที่ใช้เป็นวัตถุดิบเริ่มต้น มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อคุณสมบัติของไบโอชาร์ โดยชีวมวลแต่ละชนิดมีองค์ประกอบของลิกโนเซลลูโลสที่แตกต่างกัน ส่งผลต่อคาร์บอนคงตัว ความพรุน และพื้นที่ผิวจำเพาะของไบโอชาร์ ตัวอย่างเช่น งานของ Wijitkosum & Jiwnok., 2019 ศึกษาการสังเคราะห์ไบโอชาร์จากเหง้ามันสำปะหลัง ต้นมันสำปะหลัง และซังข้าวโพด พบว่าได้ไบโอชาร์ที่มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูง 62.95

ถึง 81.35% และมีโครงสร้างรูพรุนที่พัฒนาเด่นชัด ส่วนงานของ Salehi et al., 2020 ที่ใช้เศษใบชา เป็นวัสดุดิบ พบว่าไบโอชาร์ที่ได้มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงสุดประมาณ 38.42 %

ในด้านของอุณหภูมิในการไพโรไลซิส ซึ่งเป็นอีกปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการสลายตัวขององค์ประกอบทางชีวภาพ เช่น เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน พบว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้เกิดการสลายตัวที่สมบูรณ์มากขึ้น ช่วยเพิ่มความเสถียรของไบโอชาร์และเพิ่มปริมาณคาร์บอนคงตัว โดย Aup-Ngoen & Noipitak., 2020 รายงานว่าการเพิ่มอุณหภูมิจาก 400 เป็น 600 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ค่าคาร์บอนคงตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่ในขณะเดียวกัน น้ำหนักของชีวมวลจะลดลงจากการสลายตัวขององค์ประกอบทางธรรมชาติ เหมือนกับ Mohamed Noor et al., 2012 ที่ศึกษาต้นมันสำปะหลัง และเหง้ามันสำปะหลัง พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิไพโรไลซิสตั้งแต่ 400 ถึง 600 องศาเซลเซียส ภายใต้อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที มีผลทำให้ค่าคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยในกรณีของต้นมันสำปะหลัง ค่าคาร์บอนคงตัวเพิ่มจาก 78.39% ที่ 400 องศาเซลเซียส เป็น 87.00% ที่ 600 องศาเซลเซียส และในกรณีของเหง้ามันสำปะหลัง ค่าคาร์บอนคงตัวเพิ่มจาก 79.20% เป็น 84.11% ตามลำดับ ขณะที่ปริมาณความชื้นและสารระเหยลดลงอย่างต่อเนื่อง แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิมิมีบทบาทสำคัญในการกำจัดองค์ประกอบที่ไม่เสถียรและเพิ่มสัดส่วนของคาร์บอนในไบโอชาร์อย่างมีประสิทธิภาพ

สำหรับระยะเวลาในการไพโรไลซิส ก็มีบทบาทสำคัญเช่นกัน โดย Wijitkosum & Jiwonok, 2019 ใช้ระยะเวลา 12 ถึง 24 ชั่วโมง และใช้เตาตัดแปลงจากถังเหล็กขนาด 200 ลิตร ภายใต้สภาวะไม่มีออกซิเจน พบว่าได้ไบโอชาร์ที่มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูง และโครงสร้างรูพรุนที่พัฒนาเด่นชัด แสดงให้เห็นถึงประโยชน์ของการให้เวลาที่เพียงพอเพื่อให้การสลายตัวขององค์ประกอบอินทรีย์สมบูรณ์ และในงานของ Aup-Ngoen & Noipitak., 2020 และ Mohamed Noor et al., 2012 ใช้ระยะเวลาเพียง 1 ถึง 2 ชั่วโมง โดยใช้เตาเผาไพโรไลซิสในระดับห้องปฏิบัติการ ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิได้แม่นยำ เตาประเภทนี้เหมาะสำหรับการผลิตในขนาดเล็ก และช่วยป้องกันการเกิดออกซิเดชันในระหว่างกระบวนการเผาไหม้ ส่งผลให้ได้ไบโอชาร์ที่มีความบริสุทธิ์สูงและคุณภาพดี อย่างไรก็ตาม การใช้ระยะเวลานานกว่ามีแนวโน้มช่วยให้เกิดการพัฒนาโครงสร้างรูพรุนและเสถียรภาพของคาร์บอนได้มากยิ่งขึ้น ดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 การสังเคราะห์ไบโอชาร์จากชีวมวล

อ้างอิง	ชนิดชีวมวล	อุณหภูมิในการไพโรไลซิส	ระยะเวลาในการไพโรไลซิส	อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ	สรุปผลการศึกษา
AUP-NGOEN, K., & Noipitak, M., 2020	เหง้ามันสำปะหลัง เปลือกทุเรียน เปลือกสับปะรด ซังข้าวโพด	400-600 องศาเซลเซียส	2 ชั่วโมง	5 องศาเซลเซียสต่อ นาทีก	ปริมาณคาร์บอนคงตัวในวัสดุชีวมวลสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น
SALEHI, E., et al., 2020	เศษใบชา	300-500 องศาเซลเซียส	-	5 องศาเซลเซียสต่อ นาทีก	เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น มีการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวจำเพาะจาก 1.9 ตารางเมตรต่อกรัม เป็น 5.6 ตารางเมตรต่อกรัม
WIJITKOSUM, S., & Jiwonok, P., 2019	เหง้ามันสำปะหลัง ต้นมันสำปะหลัง ซังข้าวโพด	500-600 องศาเซลเซียส (ควบคุมอุณหภูมิในช่วงนี้)	12-24 ชั่วโมง	-	ไบโอชาร์ที่ได้มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูง (62.95–81.35 เปอร์เซ็นต์) และโครงสร้างรูพรุนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ
MOHAMED NOOR, N., et al., 2012	ลำต้นมันสำปะหลัง เหง้ามันสำปะหลัง	400-600 องศาเซลเซียส	1 ชั่วโมง	5-25 องศาเซลเซียส ต่อนาทีก	อุณหภูมิสูงขึ้นและอัตราการให้ความร้อนที่สูงขึ้นทำให้ปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณผลผลิตไบโอชาร์ลดลง

2.9.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับสารปราบศัตรูพืชด้วยไบโอชาร์

จากการทบทวนวรรณกรรม พบว่าไบโอชาร์ที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปลงสามารถดูดซับสารกำจัดศัตรูพืชได้อย่างมีประสิทธิภาพในระดับหนึ่ง เนื่องจากประสิทธิภาพการดูดซับขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวลและเงื่อนไขในการผลิต โดย Mandal et al., 2017 ศึกษาการดูดซับอาหารสีนและอิมิดาโคลพริตด้วยไบโอชาร์จากชีวมวล 5 ชนิดภายใต้สภาวะเดียวกัน ได้แก่ เปลือกยูคาลิปตัส (EBBC) ชังข้าวโพด (CCBC) เศษไม้ไผ่ (BCBC) แกลบ (RHBC) และ ฟางข้าว (RSBC) ผลการศึกษา พบว่าไบโอชาร์จากฟางข้าว (RSBC) ให้ผลการดูดซับสูงที่สุดในกลุ่มไบโอชาร์ โดยมีค่าการดูดซับอาหารสีนอยู่ในช่วง 37.5 ถึง 70.7 เปอร์เซ็นต์ และอิมิดาโคลพริต 39.9 ถึง 77.7 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือ แกลบ, เปลือกยูคาลิปตัส, ชังข้าวโพด และ เศษไม้ไผ่ ตามลำดับ นอกจากนี้ Mayakaduwa et al., 2016 รายงานว่าไบโอชาร์จากเศษใบชาที่ผ่านการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพสูงในการดูดซับคาร์โบฟูราน โดยมีความจุการดูดซับสูงสุดที่ 22.75 มิลลิกรัมต่อกรัมที่พีเอช 5 และจากการวิเคราะห์ FTIR ก่อนดูดซับพบว่าหมู่ฟังก์ชันสำคัญ เช่น -OH, -COOH และ -C=O ปรากฏบนพื้นผิวไบโอชาร์ แต่หลังดูดซับความเข้มข้นของหมู่ -OH และ -COOH ลดลง แสดงถึงการมีปฏิสัมพันธ์กับคาร์โบฟูรานผ่านการเกิดพันธะไฮโดรเจน ซึ่งให้เห็นว่ากลไกการดูดซับของไบโอชาร์ที่ไม่ได้ดัดแปลงประกอบด้วย การเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ฟังก์ชัน -OH และ -COOH การยึดเหนี่ยวด้วยแรงไฟฟ้าสถิต และปฏิสัมพันธ์แบบ $\pi-\pi$ ระหว่างวงแหวนอะโรมาติกบนผิวไบโอชาร์และสารกำจัดศัตรูพืช ซึ่งสะท้อนว่าแม้ไม่มีการดัดแปลง แต่ไบโอชาร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันพื้นผิวที่เหมาะสมก็ยังสามารถดูดซับสารพิษจากน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในทางกลับกัน การดัดแปลงไบโอชาร์ด้วยกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มขีดความสามารถในการดูดซับ โดยเฉพาะต่อสารเคมีกำจัดศัตรูพืชที่มีขั้วสูง จากงานของ Mandal et al., 2017 พบว่าเมื่อไบโอชาร์จากฟางข้าว (RSBC) ได้รับการดัดแปลงเป็น T-RSBC การดูดซับมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น โดยมีค่าการดูดซับของอาหารสีนเพิ่มขึ้นจากเป็น 59.5 ถึง 89.8 เปอร์เซ็นต์ และอิมิดาโคลพริตเพิ่มเป็น 58.2 ถึง 89.5 เปอร์เซ็นต์ แม้ว่าพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของ T-RSBC จะลดลง แต่เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยกลับเพิ่มขึ้นจาก 19.23 เป็น 29.54 นาโนเมตร ซึ่งเอื้อต่อการเข้าถึงของสารขนาดใหญ่หรือมีขั้วสูงได้ดียิ่งขึ้น การเพิ่มหมู่ฟังก์ชัน เช่น -OH และ -COOH จากการดัดแปลงยังเสริมแรงยึดเหนี่ยวผ่านพันธะไฮโดรเจนและแรงแวนเดอร์วาลส์ นอกจากนี้ ค่า R^2 ที่สูงกว่า 0.99 บ่งชี้ว่าพฤติกรรมดูดซับสามารถอธิบายได้ดีด้วยแบบจำลองฟรันทซ์ลิช ผลการศึกษายังพบว่า อิมิดาโคลพริต ซึ่งเป็นสารที่มีประจุบวกภายใต้พีเอช 6.9 ถึง 10.1 จะมีแรงยึดเหนี่ยวที่มากกว่าเมื่อจับกับผิวไบโอชาร์ที่มีประจุลบ ส่วนอาหารสีนที่อยู่ในรูปกลาง (Neutral Species) ในช่วงพีเอชเดียวกันจะมีปฏิสัมพันธ์น้อยกว่าดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการดัดแปลงไบโอชาร์ด้วยกรดฟอสฟอริกส่งผลเชิงบวกต่อประสิทธิภาพการดูดซับทั้งในเชิงกลไกและเชิงปริมาณ ดังตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 การดูดซับสารเคมีกำจัดศัตรูพืชด้วยไบโอชาร์

อ้างอิง	ชนิดของไบโอชาร์	ชนิดสารเคมีกำจัดศัตรูพืช	เครื่องมือวิเคราะห์	ผลการศึกษา	กลไกการดูดซับ
MANDAL, A., et al., 2017	เปลือกยูคาลิปตัส (EBBC) ชั่งข้าวโพด (CCBC), เศษไม้ไผ่ (BCBC), แกลบ (RHBC), ฟางข้าว (RSBC) ฟางข้าวที่ผ่านการตัดแปลงด้วยกรดฟอสฟอริก (T-RSBC)	อาหาราซีน(Atrazine) อิมิดาโคลพริด (Imidacloprid)	Highperformance liquid chromatography (HPLC).	- RSBC: อาหาราซีน (37.5–70.7%) อิมิดาโคลพริด (39.9–77.8%) T-RSBC: อาหาราซีน (58.9–89.8%) อิมิดาโคลพริด (58.2–89.5%)	- พันธะไฮโดรเจน (-OH, -COOH) - แรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต
TAHA, S. M., et al., 2014	ฟางข้าว (BRc) ชั่งข้าวโพด (BCn)	Azinphos-methyl, Phosmet, Boscalid, Chlorfenvinphos, Flutolanil, Diazinon, Carbaryl, Malathion, Imidacloprid, Acetamiprid, Propiconazole, Flusilazole, Triadimenol, Atrazine และ Oxamyl	Liquid Chromatography Tandem Mass Spectrometry (LC–MS/MS).	- TBRC: ลดความเข้มข้นของสารกำจัดศัตรูพืชในน้ำเหลือ $\leq 0.005 \mu\text{g/L}$ ภายใน 2 ชั่วโมง สำหรับ Oxamyl ลดลงเหลือ $\leq 0.068 \mu\text{g/L}$ ภายใน 24 ชั่วโมง	- พันธะไฮโดรเจน (-OH, -COOH) - แรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต แรงแวนเดอร์วาลส์
MAYAKAD UWA, S. S., et al., 2016	เศษใบชา (Tea Waste)	คาร์โบฟูราน (Carbofuran)	- UV–Vis Spectrophotometer	- ค่าการดูดซับสูงสุดอยู่ที่ 22.75 mg/g	- พันธะไฮโดรเจน (-OH, -COOH) - แรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต ปฏิสัมพันธ์แบบ π - π ระหว่างวงแหวนอะโรมาติกของไบโอชาร์และคาร์โบฟูราน
อ้างอิง	ชนิดของไบโอชาร์	ชนิดสารเคมีกำจัดศัตรูพืช	- เครื่องมือวิเคราะห์	ผลการศึกษา	- กลไกการดูดซับ