ไบโอชาร์ (วัสดุมหัศจรรย์) : การสังเคราะห์ พิสูจน์เอกลักษณ์ และศักยภาพการประยุกต์ใช้งาน

Biochar (Magical Material) : Synthesis, Characterization and Potential Applications

กรกนก โกศล ศศิธร ศรีอ่อน พรรณพรรธน์ จำปาแพง และ สายันต์ แสงสุวรรณ*

Kornkanok Koson Sasithon Sriooon Punnapat Jumpapaeng and Sayant Saengsuwan*

ห้องปฏิบัติการวัสดุพอลิเมอร์และยางขั้นสูง (APRM) ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

Laboratory of Advanced Polymer and Rubber Materials (APRM), Department of Chemistry, Faculty of Science, Ubon Ratchathani University

*E-mail: sayant.s@ubu.ac.th

Received: May 12, 2022

Revised: Sep 05, 2022

Accepted: Sep 06, 2022

บทคัดย่อ

ไบโอชาร์ที่ผลิตจากสารชีวมวลเป็นไบโอชาร์ที่อุดมไปด้วยคาร์บอน การผลิตไบโอชาร์จากสารชีวมวลอาศัยกระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งเป็นกระบวนการเผาไหม้ด้วยความร้อนโดยไม่ใช้ออกซิเจน หรือในสภาวะจำกัดออกซิเจน ไบโอชาร์มักถูกใช้เพื่อลดปัญหาสิ่งแวดล้อมด้านต่าง ๆ เช่น ช่วยลดปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศได้โดยกักเก็บคาร์บอนในดิน และใช้เพื่อปรับปรุงดินสำหรับทำการเกษตรเนื่องจากถ่านคาร์บอนมีพื้นที่ผิวสูงและมีปริมาณรูพรุนสูง จึงสามารถช่วยกักเก็บน้ำและธาตุอาหารในดินให้กับพืชได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ไบโอชาร์ยังสามารถแก้ปัญหามลภาวะทางน้ำได้ด้วย โดยการดูดซับสารหรือโลหะหนักเอาไว้ในโครงสร้างและรูพรุนของไบโอชาร์ เนื่องจากไบโอชาร์มีประโยชน์ใช้งานที่หลากหลายและมีต้นทุนในการผลิตต่ำ จึงทำให้ไบโอชาร์เป็นวัสดุที่น่าสนใจในการนำไปศึกษาวิจัยต่อยอดเพื่อพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในด้านอื่น ๆ ได้อีกมากมาย บทความนี้นำเสนอวิธีการเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์ และการประยุกต์ใช้ไบโอชาร์ทั้งในปัจจุบันและในอนาคต

คำสำคัญ: ไบโอชาร์ วัสดุชีวมวล ไพโรไลซิส

Abstract

The biochar produced from biomass is carbon rich biochar. The production of biochar from biomass relies on pyrolysis, a process of anaerobic combustion or minimal thermal combustion. Biochar is usually used to reduce many environmental problems such as reduction of carbon dioxide in the atmosphere by sequestering carbon in the soil. It is also used to improve agriculture soil due to its high surface area and high porosity which can help to retain the water and nutrients in the soil for plants. In addition, biochar can solve water pollution problems by absorbing substances or heavy metals into its structures and pores. Owning to its various applications and a low-cost production, biochar is an interesting material for further development to be the promising products used in many applications. This review paper presents the synthesis, characterization and applications in present and future of biochar.

Keywords: Biochar, Biomass, Pyrolysis

1. บทนำ

ในปัจจุบันมีการพัฒนาอุตสาหกรรมต่าง ๆ อย่างรวดเร็วและเติบโตขึ้นอย่างมากจึงทำให้มีการปลดปล่อยของเสียจำนวนมากสู่สิ่งแวดล้อมซึ่งส่งผลกระทบอย่างมากต่อระบบนิเวศ ธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมและอาจจะทวีความรุนแรงยิ่งขึ้นในอนาคต โดยสาเหตุหลัก ๆ ของปัญหาสิ่งแวดล้อมมาจากอุตสาหกรรมจำพวก ยาฆ่าแมลง ปิโตรเลียม โลหะหนัก ปุ๋ย และยาปฏิชีวนะ เป็นต้น [1] มลพิษเหล่านี้ส่งผลให้คุณภาพสิ่งแวดล้อม บรรยากาศและน้ำแย่ลงและก่อให้เกิดสารก่อมะเร็งซึ่งเป็นอันตรายต่อมนุษย์ สัตว์ และสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ ตลอดจนมีผลกระทบต่อการเจริญเติบโตและคุณภาพของพืชอีกด้วย [2] เนื่องจากการปนเปื้อนในดินซึ่งอาจทำให้เกิดดินเปรี้ยว ดินเค็ม หรือมีโลหะหนักหรือสารอื่น ๆ ปะปนซึ่งอาจถูกชะล้างและทำให้แหล่งน้ำเกิดการปนเปื้อนได้ ปัญหาเหล่านี้นอกจากกระทบต่อภาคอุตสาหกรรมการเกษตรแล้ว ยังกระทบต่อแหล่งน้ำและเศรษฐกิจของประเทศอีกด้วย เพื่อแก้ไขปัญหาเหล่านี้จึงได้มีการศึกษาเกี่ยวกับวัสดุดูดซับที่ได้จากธรรมชาติและสารชีวมวลเพื่อลดปริมาณขยะชีวมวลทางการเกษตร นั่นก็คือ “ไบโอชาร์” (Biochar)

ไบโอชาร์หรือถ่านชีวภาพ ทำหน้าที่ในการกักเก็บน้ำ เป็นแหล่งธาตุอาหาร ใช้เป็นแหล่งอาศัยของจุลินทรีย์ ปรับสภาพดินและใช้เป็นสารกระตุ้นในการทำปฏิกิริยา ช่วยให้ธาตุอาหารแก่พืชทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนประจุบวกได้ดีขึ้น ส่งผลให้พืชมีการเจริญเติบโตและให้ผลผลิตเพิ่มขึ้น ทั้งยังสามารถกักเก็บคาร์บอนไว้ในดินได้นานหลายปี ทั้งนี้ไบโอชาร์กำลังเป็นที่สนใจของเกษตรกรทั่วโลกเนื่องจากเป็นนวัตกรรมที่ช่วยแก้ไขปัญหาดินเสื่อมโทรมได้ดังแสดงใน Figure 1 [3] โดยไบโอชาร์สามารถเตรียมได้จากกระบวนการย่อยสลายเชิงความร้อนในสภาวะไร้ออกซิเจนของชีวมวลหรือสารอินทรีย์ซึ่งเป็นสารประกอบของสิ่งมีชีวิตที่ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ (เช่น ต้นไม้ เศษใบไม้ กิ่งไม้ เศษวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร เช่น ฟางข้าว ตอซัง ซังข้าวโพด เปลือกถั่ว เปลือกผลไม้ เหง้ามันสำปะหลัง เศษอาหารในครัวเรือนหรือมูลสัตว์ เป็นต้น) กระบวนการย่อยสลายเชิงความร้อนในสภาวะไร้ออกซิเจนนี้เรียกว่า “ไพโรไลซิส” (Pyrolysis) [4]

มีรายงานว่าไบโอชาร์ไม่เพียงปรับปรุงคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของดินเท่านั้น แต่ยังปรับปรุงสมบัติของจุลินทรีย์ในดินด้วย งานวิจัยจำนวนมากระบุว่าการผสมผสานของไบโอชาร์กับดินสามารถปรับปรุงโครงสร้างของดิน เพิ่มความพรุน ลดความหนาแน่นของมวลรวม และช่วยการกักเก็บน้ำ นอกจากนี้ ไบโอชาร์ยังสามารถเพิ่มการนำไฟฟ้าของดินได้ถึง 124.6% และเพิ่มความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก 20% ในขณะที่ลดความเป็นกรดของดินลง 31.9% นอกจากนี้ไบโอชาร์ยังได้รับการทดสอบเพื่อเพิ่มองค์ประกอบทางชีววิทยาและชีวมวลของจุลินทรีย์ด้วย [3] ในบทความนี้จะกล่าวถึง คุณลักษณะ ประโยชน์ของไบโอชาร์ และการเผาชีวมวลโดยกระบวนการไพโรไลซิสในอุณหภูมิที่ต่าง ๆ รวมไปถึงการพิสูจน์เอกลักษณ์และการประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ โดยพบว่าไบโอชาร์มีคุณสมบัติที่เด่นในการปรับปรุงดินซึ่งสามารถกักเก็บน้ำ ป้องกันการสลายตัวของดินและกักเก็บคาร์บอนไว้ในดิน เป็นแหล่งธาตุอาหารที่จำเป็นทำให้ดินมีความอุดมสมบูรณ์มากขึ้น ทั้งยังช่วยลดปริมาณวัสดุเหลือทิ้งจากธรรมชาติและทางการเกษตรได้อีกด้วย

Figure 1 Benefits of biochar in soil fertility management [3]

2. ลักษณะของไบโอชาร์

ไบโอชาร์มีลักษณะเป็นของแข็งสีดำ มีรูพรุนและมีธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ และขี้เถ้าเป็นองค์ประกอบแสดงใน Figure 2 แต่ละองค์ประกอบจะเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของสารชีวมวลและปัจจัยที่เกี่ยวข้องในกระบวนการไพโรไลซิสที่ใช้ในการผลิตไบโอชาร์ เช่น อุปกรณ์ อุณหภูมิ และ ระยะเวลา เป็นต้น [4] การวิเคราะห์คุณลักษณะของไบโอชาร์มีความสำคัญอย่างมากในการพิจารณาองค์ประกอบ การทำงานของพื้นผิว ความเสถียรและโครงสร้าง

Figure 2 The structure and composition of biochar [5]

การระบุลักษณะไบโอชาร์สามารถทำได้โดยใช้ เทคนิคสมัยใหม่ต่างๆ เช่น การวิเคราะห์พื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR) การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อน (TG) การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) การวิเคราะห์หาปริมาตรรูพรุนบนพื้นผิวของวัสดุ (BET) และการวิเคราะห์องค์ประกอบของวัสดุด้วยเทคนิคการสั่นพ้องของแม่เหล็กนิวเคลียร์ (NMR) [6]

ถ่านชีวภาพมีสมบัติที่เหมาะสมกับการปรับปรุงดินหลายอย่าง แต่สิ่งที่สำคัญที่สุด คือ รูพรุนบนผิวของถ่านชีวภาพ ทำให้ถ่านชีวภาพสามารถเก็บกักน้ำและธาตุอาหารรวมทั้งเป็นที่อยู่ของจุลินทรีย์ในดินที่มีประโยชน์และถ่านชีวภาพยังสามารถแก้ไขมลพิษในดินปรับปรุงคุณภาพดิน เพิ่มผลผลิตพืชและลดการปล่อยแก๊สเรือนกระจก และมีสมบัติในการดูดซับสูง ขนาดและปริมาณของความพรุนในถ่านนี้ขึ้นอยู่กับวัสดุที่นำมาเผาเป็นถ่านและกรรมวิธีการเผา สมบัติรองลงมาก็คือ ถ่านมีสภาพที่เป็นด่างเล็กน้อย จึงช่วยลดสภาพความเป็นกรดของดินลงได้บางส่วน นอกจากนี้ ถ่านชีวภาพมีธาตุไนโตรเจน (ที่เป็นประโยชน์กับพืช) รวมทั้งมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก ทำให้เก็บกักธาตุอาหารได้มาก

3. การเตรียมไบโอชาร์และผลของสภาวะการเตรียม

3.1. ไพโรไลซิส

ไพโรไลซิสหรือการสลายตัวด้วยความร้อนภายใต้สภาวะที่ปราศจากออกซิเจนในช่วงอุณหภูมิ 250-900 °C เป็นเทคนิคหรือวิธีที่ใช้ในการเปลี่ยนวัสดุชีวมวลเหลือทิ้งให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่ม เช่น ไบโอชาร์ แก๊สสังเคราะห์ และไบโอ-ออยล์ ในระหว่างกระบวนการไพโรไลซิส สารพวกเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนินจะเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ เช่น การหลุดจากโซ่พอลิเมอร์ การแตกหักและการเชื่อมขวางที่อุณหภูมิเฉพาะซึ่งจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ในสถานะต่าง ๆ เช่น ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส ผลผลิตไบโอชาร์จะขึ้นอยู่ชนิดและธรรมชาติของสารชีวมวลดังแสดงใน Figure 3 โดยอุณหภูมิจะเป็นปัจจัยหลักในการกำหนดประสิทธิภาพของไบโอชาร์ซึ่งหากเพิ่มอุณหภูมิมากขึ้นจะได้ผลผลิตไบโอชาร์น้อยลง กระบวนการไพโรไลซิสถือเป็นหนึ่งเทคนิคของการเปลี่ยนแปลงเคมีทางความร้อนและสามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภท คือ ไพโรไลซิสแบบช้าและแบบเร็วซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราเร็วในการให้ความร้อน อุณหภูมิ เวลาการเผา และความดัน ดังนี้

ไพโรไลซิสแบบเร็ว: สภาวะของไพโรไลซิสแบบเร็ว: (1) เพิ่มอุณหภูมิแก่ชีวมวลอย่างรวดเร็ว (>100 °C/นาที) (2) จากนั้นเติมอนุภาคชีวมวลและควันแก๊ส ไพโรไลซิสเพิ่มในช่วงเวลาสั้น ๆ (0.5–2 วินาที) ที่อุณหภูมิสูง และ (3) รักษาอุณหภูมิไพโรไลซิสที่อุณหภูมิปานกลาง (400-600 °C) [6]

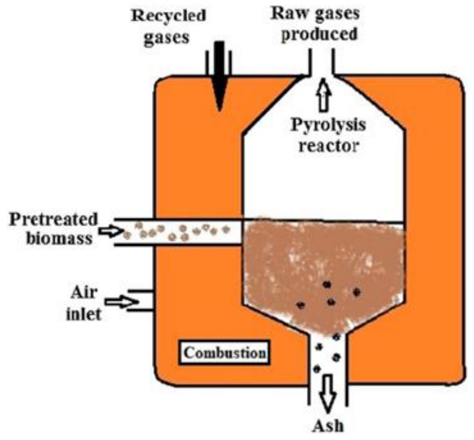

Figure 3 Pyrolysis process [6]

ไพโรไลซิสแบบช้า: เผาที่อุณหภูมิ 300-700 °C อัตราการให้ความร้อนจะน้อยกว่ามาก เช่นประมาณ 5-7 °C/นาที และมีระยะในการเวลาเผานานกว่า 1 ชั่วโมง [7]

3.2. ผลของสภาวะการเตรียม

ปริมาณธาตุองค์ประกอบของไบโอชาร์ในกระบวนการไพโรไลซิสนั้นขึ้นอยู่กับชนิดและลักษณะของสารชีวมวลที่ใช้ซึ่งส่งผลต่อสมบัติของไบโอชาร์ เช่น วัตถุดิบ อุณหภูมิของปฏิกิริยา อัตราการให้ความ ร้อน ระยะเวลาในการเผาสารในเครื่องและการเตรียมสารชีวมวล [8]

3.2.1. วัตถุดิบ

วัสดุชีวมวลถือเป็นวัสดุของแข็งที่ประกอบด้วยวัสดุทางชีวภาพ สารอินทรีย์หรืออนินทรีย์ ซึ่งได้มาจากสิ่งมีชีวิต ชีวมวลมีลักษณะเป็นสองประเภท (1) ชีวมวลของไม้ และ (2) ชีวมวลที่ไม่ใช่ไม้

ชีวมวลของไม้ประกอบด้วยไม้ยืนต้นทั่วไปรวมถึงเศษไม้และเศษไม้จากป่าไม้ [9] สมบัติของชีวมวลไม้ ได้แก่ มีความชื้นต่ำ มีเศษน้อย มีความหนาแน่นสูง ส่วนชีวมวลที่ไม่ใช่เนื้อไม้ประกอบด้วยของเสียจากสัตว์ ของเสียที่เป็นของแข็งทางอุตสาหกรรมและทางการเกษตร สมบัติของชีวมวลที่ไม่ใช่ไม้ ได้แก่ มีเศษซากสูง มีความชื้นสูง มีความหนาแน่นต่ำ และให้ค่าความร้อนต่ำ ในบรรดาคุณลักษณะต่าง ๆ ของวัตถุดิบชีวมวล ปริมาณความชื้นส่งผลกระทบอย่างมากต่อการเกิดไบโอชาร์ ความชื้นในสารชีวมวลสามารถอยู่ในรูปต่าง ๆ เช่น น้ำ ไอน้ำ และความชื้นที่อยู่ในรูพรุนของสารชีวมวล ปริมาณความชื้นที่สูงในชีวมวลจะยับยั้งการเกิดถ่านและต้องใช้พลังงานเพิ่มขึ้นในกระบวนการไพโรไลซิส สารที่มีปริมาณความชื้นต่ำจะเหมาะสำหรับทำถ่านชีวภาพ/ไบโอชาร์เนื่องจากใช้พลังงานความร้อนน้อยและลดเวลาสำหรับกระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งทำให้การผลิตไบโอชาร์เป็นไปได้ในเชิงเศรษฐกิจเมื่อเทียบกับชีวมวลที่มีความชื้นสูง [6]

3.2.2. อุณหภูมิ

ไพโรไลซิสเป็นวิธีการที่นิยมมากที่สุดในการเปลี่ยนชีวมวลเป็นถ่านชีวภาพโดยผ่านกระบวนการสลายตัวทางความร้อนเคมีภายใต้สภาวะที่ไร้ออกซิเจนที่อุณหภูมิสูงเมื่ออุณหภูมิไพโรไลซิสเพิ่มขึ้น ผลผลิตของไบโอชาร์และจำนวนของหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรด (COOH) จะลดลง ในขณะที่หมู่ฟังก์ชันอัลคาไลน์ ปริมาณเถ้า และ pH จะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้อุณหภูมิของการไพโรไลซิสยังส่งผลอย่างมากต่อพื้นที่ผิวและปริมาณรูพรุนของไบโอชาร์ จากการศึกษาของ Chen et al. [10] พบว่า การเผาไม้ไผ่ที่อุณหภูมิ 450 และ 600 °C จะมีพื้นที่ผิว 10.2 และ 375.5 m^2/g ตามลำดับ และเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนของไบโอชาร์เปลือกส้มที่เผาที่อุณหภูมิ 400 และ 700 °C มีขนาด 2.9 และ 1.6 นาโนเมตร ตามลำดับ

3.2.3. ระยะเวลาเผา

ที่อุณหภูมิไพโรไลซิสเดียวกัน ผลผลิตของไบโอชาร์จะลดลงตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น [3] ได้เปรียบเทียบถ่านจากต้นแตงกวาและเปลือกส้มโดยไพโรไลซิสที่ 700 °C เป็นระยะเวลา 2 และ 6 ชั่วโมง พบว่าได้ผลผลิตไบโอชาร์อยู่ที่ 27.52% และ 5.93% ตามลำดับ Lu et al. [11] ได้ศึกษาการเตรียมไบโอชาร์จากกากตะกอนน้ำเสียโดยการแปรอุณหภูมิไพโรไลซิสจาก 400 ถึง 850 °C และเวลาเผาจาก 0.5 ถึง 3 ชั่วโมง ตามลำดับ พบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะและรูพรุนลดลง เมื่อเพิ่มระยะเวลาการเผาจาก 2 เป็น 3 ชั่วโมง เหตุผลก็คือ การเพิ่มเวลาช่วยเอื้อต่อการพัฒนารูพรุนของไบโอชาร์ แต่ถ้าเวลามากเกินไปอาจทำให้โครงสร้างของรูพรุนเสียหายได้

3.2.4. การเตรียมสารชีวมวล

การบำบัดสารชีวมวลก่อนกระบวนการไพโรไลซิสจะส่งผลต่อคุณลักษณะของไบโอชาร์ วิธีการบำบัดที่ใช้ทั่วไปคือ การแช่ในสารละลายและการลดขนาดของชีวมวล การลดขนาดสารชีวมวลจะส่งผลให้ได้ผลผลิตไบโอชาร์สูง เช่น ไบโอชาร์ของไม้สนที่บำบัดโดยแช่สารชีวมวลในสารละลายกรดเจือจางก่อนเผา นอกจากนี้วิธีการบำบัดอื่น ๆ เช่น การเติมไนโตรเจนและโลหะจะส่งผลต่อการผลิตไบโอชาร์ และ การบำบัดโดยการแช่สารละลายหรือนึ่งไอน้ำก็สามารถส่งผลต่อองค์ประกอบและสมบัติของไบโอชาร์ได้ ในขณะที่การบำบัดด้วยการอบก่อนก็สามารถเพิ่มปริมาณคาร์บอนและลดปริมาณออกซิเจนและความชื้นของไบโอชาร์ได้ [6]

สารชีวมวลที่มีศักยภาพในการผลิตไบโอชาร์จะถูกใช้แบบเดี่ยวหรือผสมกันก็ได้ขึ้นอยู่กับนวัตกรรมที่ใช้ ในทางปฏิบัติมักจะถูกจำกัดโดยความชื้นหรือแร่ธาตุของชีวมวล เช่น การมีคลอรีนและโลหะที่ละลายได้ทำให้เกิดการบริโภคได้ เนื่องจากเทคโนโลยีการผลิตและชีวมวลที่หลากหลาย สมบัติของไบโอชาร์ที่ผลิตขึ้นจึงสามารถประยุกต์ใช้ได้ในวงกว้าง ในขณะที่ธาตุองค์ประกอบอื่น ๆ เช่น ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) ไนโตรเจน (N) และกำมะถัน (S) จะระเหยไประหว่างกระบวนการไพโรไลซิส แต่แร่ธาตุจำพวกฟอสฟอรัส (P) โพแทสเซียม (K) แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) และซิลิกอน (Si) จะยังคงอยู่ การเกิดขึ้นของสารประกอบหรือส่วนประกอบที่เป็นอันตรายในไบโอชาร์อาจมาจากสารชีวมวลที่ปนเปื้อนในระหว่างกระบวนการไพโรไลซิสซึ่งเกิดเป็นแก๊สขึ้น [12]

3.3. การดัดแปรไบโอชาร์

แม้ว่าไบโอชาร์สามารถนำไปใช้ปรับปรุงดินและสภาพแวดล้อมได้โดยไม่ปรับแต่งคุณสมบัติใด ๆ เพิ่มเติม แต่ในการประยุกต์ใช้งานที่จำเพาะเจาะจง อาจจะต้องปรับปรุงสมบัติของไบโอชาร์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น เราสามารถปรับแต่งสมบัติของไบโอชาร์เพิ่มเติมด้วยวิธีการต่าง ๆ ดังแสดงใน Figure 4 เช่น การดัดแปรทางเคมีและทางกายภาพ

โดยพบว่าการดัดแปรทางเคมีเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายซึ่งประกอบด้วยการดัดแปรด้วยกรดและด่าง การดัดแปรด้วยสารออกซิไดซ์ การดัดแปรเกลือของโลหะและการปรับเปลี่ยนวัสดุคาร์บอน ส่วนการดัดแปรทางกายภาพส่วนใหญ่หมายถึง อบด้วยไอน้ำหรือเป่าไล่ด้วยแก๊ส เป็นต้น [13]

การดัดแปรด้วยกรด ทำเพื่อกำจัดสิ่งแปลกปลอม เช่น โลหะ และเพื่อให้เกิดหมู่ฟังก์ชันของกรดบนพื้นผิวไบโอชาร์ โดยกรดที่นิยมใช้ ได้แก่ กรดซัลฟูริก กรดไนตริก กรดฟอสเฟอริก กรดออกซาลิก และ กรดซิตริก

การดัดแปรด้วยด่าง ทำเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวและเพิ่มหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจน โดยมักใช้โปรแตสเซียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์

การดัดแปรด้วยสารออกซิไดส์ ทำเพื่อเพิ่มปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนไบโอชาร์ให้มากขึ้น เช่น การใช้สารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์หรือทำเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวด้วยการใช้โพแทสเซียมเปอร์มังกาเนต เป็นต้น

การดัดแปรด้วยเกลือโลหะหรือโลหะออกไซด์ ทำเพื่อเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของการดูดซับ การเป็นตัวเร่งและสมบัติแม่เหล็กสำหรับการนำคืนกลับมาใช้ใหม่

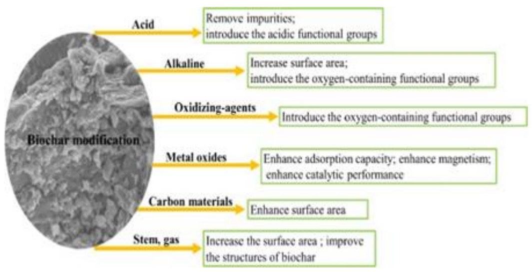

Figure 4 Modification of biochar [13]

4. การพิสูจน์เอกลักษณ์ของไบโอชาร์

โดยปกติจะวิเคราะห์เอกลักษณ์ของไบโอชาร์ที่เตรียมได้เพื่อหาความสามารถในการกำจัดมลพิษหรือการประยุกต์ใช้งานด้านอื่น ๆ การวิเคราะห์โครงสร้างและองค์ประกอบยังช่วยในการทำนายผลกระทบของไบโอชาร์ต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ พวกโลหะยังมีอันตรกิริยากับไบโอชาร์ซึ่งขึ้นกับค่า pH เช่น (1) หน้าที่ของไบโอชาร์จะแตกต่างกันที่ pH ต่าง ๆ (2) ไอออนของโลหะปนเปื้อนก็จะแปรผันตาม pH เช่นกัน คุณลักษณะเฉพาะเหล่านี้ของไบโอชาร์แสดงถึงความสามารถในการเป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับกำจัดมลพิษส่วนใหญ่ในดิน เทคนิคการวิเคราะห์ไบโอชาร์ขึ้นอยู่กับโครงสร้าง หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว และการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบ [14] ในปัจจุบัน มีเทคนิคการวิเคราะห์ที่ทันสมัยมากมายสำหรับพิสูจน์เอกลักษณ์ของไบโอชาร์ แสดงใน Figure 5 เช่น เทคนิค FTIR SEM XRD TG NMR Brunauer-Emmett-Teller (BET) และการวิเคราะห์ธาตุ

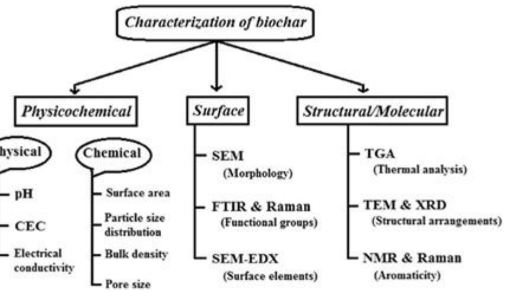

Figure 5 Characterization of biochar [6]

4.1. Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR)

หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของไบโอชาร์สามารถตรวจสอบโดยใช้เทคนิค FTIR แสดงใน Figure 6 ซึ่งเป็นเทคนิคการสั่นของโมลกุล โดยหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของไบโอชาร์ที่จำเป็นเพื่อเพิ่มสมบัติการดูดซับ ได้แก่ หมู่คาร์บอกซิลิก (COOH) หมู่ไฮดรอกซิล (OH) หมู่แอมีน แอไมด์ และหมู่แลคโตนิก ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของไบโอชาร์ คือ ชนิดสารชีวมวลและอุณหภูมิ [15] ขณะที่สมบัติอื่น ๆ เช่น pH พื้นที่ผิวและความพรุนเพิ่มขึ้นก็มีโอกาสทำให้หมู่ฟังก์ชันบนผิวไบโอชาร์ลดลง โดยไบโอชาร์ที่ผลิตที่อุณหภูมิต่างกันก็จะมีหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้แล้ว เทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (Nuclear magnetic resonance: NMR) ก็ยังสามารถใช้เพื่อวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันที่มีบนพื้นผิวของถ่านไบโอชาร์ได้

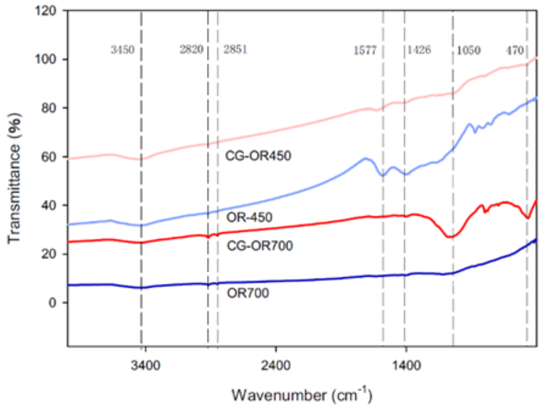

Figure 6 FTIR spectra of biochar from oil slag burned at different temperatures [16]

4.2. พื้นที่ผิวและความพรุน Brunauer-Emmett-Teller Analysis (BET)

โดยปกติไบโอชาร์ที่มีพื้นที่ผิวและความพรุนสูงจะมีสมบัติในการดูดซับสูง พื้นผิวรูพรุนบนไบโอชาร์เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการไพโรไลซิสเมื่อมีการสูญเสียน้ำเพิ่มขึ้นในระหว่างกระบวนการคายน้ำ ตามเกณฑ์ของ IUPAC รูพรุนจำแนกได้ 3 ระดับคือ ระดับไมโคร (<20 nm) มีโซ (2-50 nm) และแมคโคร (> 50 nm) ไบโอชาร์ที่มีรูพรุนน้อยจะไม่สามารถดูดซับโมเลกุลของยาฆ่าแมลงได้ แม้ว่าจะมีขั้วหรือประจุไฟฟ้าก็ตาม ขนาดของรูพรุนและพื้นที่ผิวบนไบโอชาร์สามารถศึกษาด้วยเครื่อง BET พื้นที่ผิวเป็นปัจจัยสำคัญในการบอกความสามารถในการดูดซับของไบโอชาร์ ในขณะที่อุณหภูมิมีบทบาทสำคัญต่อการเกิดไบโอชาร์ พื้นที่ผิวอาจจะแตกต่างกันระหว่างวัตถุดิบที่ผ่านและไม่ผ่านการบำบัด ถ่านกัมมันต์ทางการค้าจะมีพื้นที่ผิวมากกว่าไบโอชาร์ที่ไม่ผ่านการกระตุ้นซึ่งมีพื้นที่ผิวและรูพรุนน้อยกว่า [17] ดังนั้นในการผลิตไบโอชาร์ กระบวนการกระตุ้นจึงทำเพื่อเพิ่มความพรุนและพื้นที่ผิวถ่านไบโอชาร์ ซึ่งอาจจะเป็นการกระตุ้นทางกายภาพและทางเคมีก็ได้

4.3. Scanning electron microscopy (SEM)

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM เป็นเทคนิคที่ใช้ศึกษาสภาพพื้นผิวและลักษณะสัณฐานวิทยาของไบโอชาร์ เป็นที่ทราบกันดีว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซีสนั้น มีผลต่อความเป็นรูพรุนและลักษณะสัณฐานวิทยาของไบโอชาร์ Dhar et al. [18] ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซีสที่มีต่อลักษณะรูพรุนของไบโอชาร์จากเส้นใยมะพร้าว โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาอยู่ที่ 350 – 600°C พบว่า เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซีสเพิ่มขึ้น รูพรุนและขนาดของรูพรุนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยความยาวของรูพรุนที่อุณหภูมิ 350 - 450°C จะอยู่ระหว่าง 1 – 3 ไมโครเมตร และที่อุณหภูมิ 500 - 600°C จะอยู่ระหว่าง 3 – 10 ไมโครเมตร

จากภาพ SEM (Figure 7) พบว่ากระบวนการและอุณหภูมิต่าง ๆ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมากต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของพื้นผิวไบโอชาร์ นอกจากนี้ การปรับปรุงรูพรุนในไบโอชาร์สามารถทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิซึ่งอาจทำให้สมบัติของรูพรุนของไบโอชาร์ดีขึ้นอย่างมากและเชื่อว่าความเป็นผลึกของธาตุมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและเกิดโครงสร้างที่เป็นแอโรแมติก (aromatic structure) ในไบโอชาร์เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของไพโรไลซิส นอกจากนี้ภาพ SEM ยังแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของรูพรุนในรูปแบบต่างๆ รวมถึงการจัดเรียงตัวของรูพรุนในไบโอชาร์ดังแสดงใน Figure 7

นอกจากนี้การใช้เทคนิค SEM ร่วมกับเทคนิค Energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX) ก็สามารถระบุธาตุองค์ประกอบจำนวนมากที่อยู่บนพื้นผิวของไบโอชาร์ได้ ส่วนใหญ่จะใช้ SEM-EDX ในการตรวจพื้นผิวของไบโอชาร์ภายหลังจากดูดซับสารปนเปื้อน ข้อเสียหลักของ SEM-EDX คือ ไม่เหมาะสำหรับสารปนเปื้อนอินทรีย์

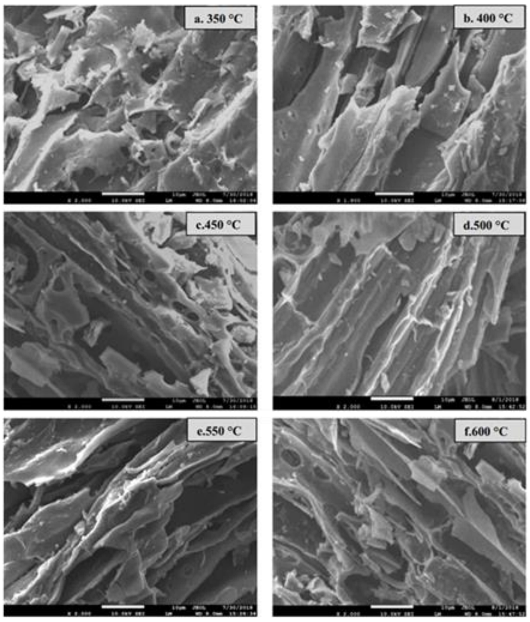

Figure 7 FESEM micrographs at 2000x magnification of biochar undergoing pyrolysis at various temperatures [18]

4.4. การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ X-ray diffraction (XRD)

การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นเทคนิคที่ใช้เพื่อศึกษาความเป็นผลึกและโครงสร้างจุลภาคของไบโอชาร์ ใน Figure 8 แสดง XRD pattern ของผลึกนาโนซึ่งมีลักษณะเป็นพีคแหลมและความเข้มสูง เมื่อเวลาเผาเพิ่มขึ้น เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคจะเพิ่มขึ้น ดังนั้นเทคนิค XRD จึงช่วยในตรวจสอบการผลิตไบโอชาร์ที่มีคุณภาพสูง รวดเร็ว และไม่ทำลายโครงสร้าง

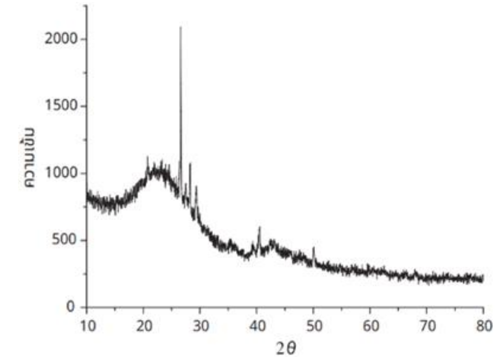

Figure 8 XRD pattern of biochar [19]

4.5. การวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (Thermogravimetry, TG)

เทคนิค TG ใช้ประเมินเสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุซึ่งสังเกตการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักสารเทียบกับอุณหภูมิ ซึ่งมีตัวอย่างเทอร์โมแกรมแสดงใน Figure 9 โดยทั่วไปแล้ว TG มักใช้เพื่อพิจารณาเกี่ยวกับการอุ่นตัวอย่างต่าง ๆ การวิเคราะห์นี้เพื่อดูการติดไฟของถ่านไบโอชาร์และส่วนผสมของสารชีวมวล/ไบโอชาร์ นอกจากนี้ค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักของแต่ละส่วนก็สามารถบอกว่าเกิดการเสริมกันระหว่างส่วนต่าง ๆ ของส่วนผสมหรือไม่ ผลลัพธ์ที่ได้อาจช่วยให้เข้าใจขั้นตอนการอุ่นและคุณลักษณะของตัวอย่างได้ดีขึ้น [20] ในการวิเคราะห์จะให้ความร้อนแก่ถ่านไบโอชาร์เริ่มจากอุณหภูมิห้องและเพิ่มขึ้นถึง 1,000 °C นักวิจัยต่าง ๆ ใช้อัตราการให้ความร้อนที่แตกต่างกัน เช่น 10 และ 20 °C/นาที เป็นต้น

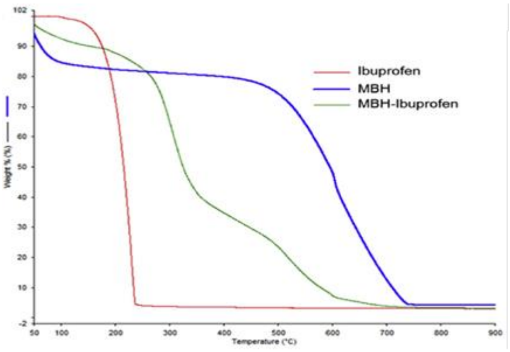

Figure 9 TG curves of MBH biochar [21]

4.6. การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Nuclear magnetic resonance spectroscopy (NMR)

โครงสร้างของไบโอชาร์สามารถตรวจสอบได้โดยใช้เทคนิค NMR ซึ่งหมู่ฟังก์ชันบนผิวไบโอชาร์จะต้องใช้เครื่อง solid-state NMR เพื่อระบุปริมาณหมู่ฟังก์ชันคาร์บอน อะลิฟาติก วงแหวนแอโรแมติกและโครงสร้างทั่วไปของโมเลกุลไบโอชาร์ การเปรียบเทียบความเสถียรและปริมาณคาร์บอนของไบโอชาร์ต่าง ๆ ก็สามารถตรวจสอบได้โดยใช้ NMR เช่นกันเครื่อง NMR แสดงใน Figure 10 [22] ข้อเสียหลักของเทคนิค NMR คือ แร่ธาตุที่เป็นเฟอร์โรแมกเนติกในถ่านไบโอชาร์อาจขัดจังหวะสัญญาณของ NMR และ ไบโอชาร์ที่ผลิตโดยไพโรไลซิสอุณหภูมิสูงจะให้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนต่ำ (signal-to-noise ratio)

Figure 10 NMR spectrometer [22]

4.7. การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี (X-ray photoelectron spectroscopy: XPS)

เอกซเรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี (XPS) จะใช้ศึกษาโครงสร้างและการจัดเรียงของไบโอชาร์ซึ่งเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่าง ๆ และชีวมวลที่หลากหลาย สามารถใช้ XPS (แสดงใน Figure 11) เพื่อแยกแยะและวัดหมู่ฟังก์ชันและธาตุองค์ประกอบพื้นฐานบนไบโอชาร์ การเปลี่ยนแปลงของหมู่ฟังก์ชันที่มีธาตุออกซิเจน หมายถึง ความเสถียรของไบโอชาร์ในระยะสั้น นอกจากนี้ XPS ยังใช้เพื่อหาอัตราส่วนโมลาร์ O/C ที่อาจเป็นตัวแทนบอกความเสถียรของไบโอชาร์ [23]

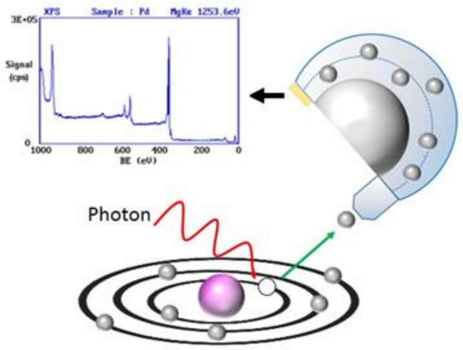

Figure 11 X-ray photoelectron spectroscopy [23]

4.8. ความเสถียรของไบโอชาร์

ความเสถียรของไบโอชาร์ต่อการย่อยสลายในดินทั้งแบบอินทรีย์และอนินทรีย์เป็นตัวบอกความสามารถในการกักเก็บคาร์บอนของไบโอชาร์ การประเมินความเสถียรของไบโอชาร์สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท: (ก) สมบัติทางตรงหรือทางอ้อมหรือการหาปริมาณของโครงสร้างคาร์บอนของถ่านไบโอชาร์ เช่น ความเป็นแอโรแมติก (ข) การหาปริมาณหรือสมบัติของคาร์บอนที่เสถียรโดยวิธีทางความร้อนหรือทางเคมีหรืออุณหเคมี เช่น การเกิดออกซิเดชันทางเคมี การสลายตัวทางความร้อน และอื่น ๆ (ค) การบ่มไบโอชาร์ในดินและการสร้างแบบจำลองของการเกิดเป็นแร่คาร์บอน [24] สมบัติที่ชัดเจนของไบโอชาร์ คือ การมีโครงสร้างคาร์บอนที่ประกอบด้วยส่วนผลึกและส่วนอสัณฐาน ดังนั้นความเสถียรของไบโอชาร์สามารถประเมินจากปริมาณคาร์บอนที่มีอยู่ในไบโอชาร์หรือโครงสร้างคาร์บอนที่เสถียร แต่กระบวนการฟักและแบบจำลองมีราคาแพงและใช้เวลานาน [25] การใช้ไอโซโทปกัมมันตภาพรังสี ^{14}C จึงเป็นแนวทางใหม่ในการวิเคราะห์ความเสถียรของถ่านไบโอชาร์โดยใช้สารคาร์บอนเชิงซ้อน ^{14}C สำหรับหาผลกระทบของไบโอชาร์และฟางต่อการเปลี่ยนแปลงของอินทรีย์คาร์บอนในดิน (Soil Organic Carbon: SOC) การประเมินความเสถียรของการเกิดออกซิเดชันทางเทอร์โมเคมีช่วยให้เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพและอนินทรีย์ อย่างไรก็ตาม เทคนิคสำหรับการระบุความเสถียรของไบโอชาร์ที่มีอยู่ในปัจจุบัน ยังไม่แม่นยำมากนักจึงยังต้องพัฒนาวิธีการใหม่ ๆ ซึ่งจะช่วยเพิ่มการใช้งานไบโอชาร์สำหรับบรรเทาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

5. การประยุกต์ใช้ไบโอชาร์

จากสมบัติของโอชาร์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ราคาไม่แพงและเตรียมได้ง่ายจากสารชีวมวลต่าง ๆ โดยใช้เทคนิคเคมีเชิงความร้อน ทำให้ไบโอชาร์ได้รับความสนใจอย่างมาก ไบโอชาร์มีบทบาทสำคัญในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนและสารมลพิษออกจากดินและสภาพแวดล้อมที่เป็นของเหลวซึ่งกำหนดได้จากประเภทของสารชีวมวลและอุณหภูมิไพโรไลซิส ไบโอชาร์ที่ผลิตโดยใช้อุณหภูมิไพโรไลซิสสูงจะมีประสิทธิภาพสูงขึ้นในการกำจัดสารมลพิษอินทรีย์เนื่องจากมีสมบัติพิเศษ เช่น ความพรุน พื้นที่ผิว pH ปริมาณคาร์บอนที่ไม่ละลายและไม่ชอบน้ำ ในขณะเดียวกัน ไบโอชาร์ที่ผลิตโดยใช้อุณหภูมิต่ำจะมีหมู่ฟังก์ชันที่ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนคาร์บอนอินทรีย์ที่ละลายน้ำสูงและมีรูพรุนน้อย ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับกำจัดมลพิษอนินทรีย์และพบว่าปัจจัยอื่น ๆ เช่น ค่า pH และเวลา ยังส่งผลต่อความสามารถในการกำจัดมลพิษของไบโอชาร์ นอกจากนี้ ไบโอชาร์ยังสามารถใช้กับงานอื่น ๆ ดังแสดงใน Figure 12 อาทิเช่น

5.1. การแก้ไขมลพิษ

5.1.1. สารมลพิษอินทรีย์

เมื่อเร็ว ๆ มานี้ มีการมุ่งเน้นใช้ไบโอชาร์เพื่อขจัดสารมลพิษอินทรีย์จากดินและน้ำ เมื่อนำไบโอชาร์ไปใช้กับดินมันจะดูดซับสารมลพิษอินทรีย์ที่มีอยู่ในดินและสารปนเปื้อนอินทรีย์ เช่น สารเคมีทางการเกษตร เช่น ยาฆ่าแมลง สารกำจัดวัชพืช ยาฆ่าแมลง สารฆ่าเชื้อรา เช่น อาทราซีน ซิมาซีน คาร์โบฟูราน เป็นต้น สารเคมีทางอุตสาหกรรม เช่น PAHs (โพลีไซคลิกแอโรแมติก ไฮโดรคาร์บอน) รวมถึงฟีแนนทรีน คาเทโคล ไพรีนแนฟทาลีน แอนทราซีน เป็นต้น ยาปฏิชีวนะและยาอะเซตามิโนเฟน เตตราไซคลิน ไอบูโพรเฟน ซัลฟาเมทาซีน ไทโลซีน เป็นต้น สีย้อมประจุบวก เช่น เมทิลีนบลู โรดามีน เมทิลีนไวโอเล็ต และ สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย เช่น บิวทานอล เบนซิน ฟูแรน ไตรคลอโรเอทิลีน เป็นต้น

การย่อยสลายและดูดซับสารมลพิษอินทรีย์ในดินจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของไบโอชาร์เพิ่มขึ้น ปริมาณสารกำจัดศัตรูพืช เช่น คาร์โบฟูแรน จะลดลงเนื่องจากการดูดซับหรือการเสื่อมสภาพของไบโอชาร์เมื่อความเข้มข้นในดินเพิ่มขึ้น การเสื่อมสภาพของคาร์โบฟูรานที่มีความหนาแน่นสูงบนพื้นผิวไบโอชาร์ระหว่างไพโรไลซิสจะกระตุ้นการขยายตัวของรูพรุนและการดูดซับของยาฆ่าแมลง สารกำจัดศัตรูพืชบางชนิดอาจถูกดูดซับบนพื้นผิวของไบโอชาร์เนื่องจากสมบัติของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิกและฟีนอลิกจึงทำให้พืชจะดูดซึมยาฆ่าแมลงในดินลดลง ดังนั้นปริมาณไบโอชาร์จึงต้องปรับให้เหมาะสมกับการใช้งานเฉพาะเพื่อช่วยในการดูดซับมลพิษเพิ่มขึ้น

กลไกการกำจัดเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างไบโอชาร์และสารมลพิษผ่านกระบวนการดูดซับทางกายภาพ (แรงดึงดูด/แรงผลักจากไฟฟ้าสถิต การแพร่กระจายของรูพรุน พันธะไฮโดรเจนและความไม่ชอบน้ำ) และกระบวนการดูดซับเคมี (แรงดึงดูดทางไฟฟ้า) ในสภาวะแวดล้อมที่มีหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ เช่น OH, COOH เป็นต้น กลไกการกำจัดอื่น ๆ ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงทางเคมี การแบ่งตัว และการย่อยสลายทางชีวภาพ [26] ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อปฏิกิริยาระหว่างสารก่อมลพิษอินทรีย์และชีวภาพ ได้แก่ อุณหภูมิ pH ชนิดของชีวมวลและอัตราส่วนของสารมลพิษและไบโอชาร์ที่ใช้

นอกจากนี้ยังพบว่าไบโอชาร์ยังช่วยลดการดูดซึมของสารอินทรีย์ในดินและการดูดซึมโดยพืชและจุลินทรีย์ เช่น ไบโอชาร์ที่ได้จากไม้เนื้อแข็งที่อุณหภูมิไพโรไลซิสสูงสามารถลดสารกำจัดศัตรูพืชในดินเนื่องจากพื้นที่ผิวของไบโอชาร์และความพรุนในการดูดซับสารมลพิษอินทรีย์นั้นไว้ ส่วนในไบโอชาร์ที่ผลิตโดยใช้อุณหภูมิต่ำ การแพร่กระจาย การแบ่งตัวและการดึงดูดด้วยไฟฟ้าสถิตถือเป็นกลไกการดูดซับหลักในการกำจัดมลพิษ ประสิทธิภาพการกำจัดระหว่างดินที่เติมและไม่เติมไบโอชาร์ พบว่าดินที่เติมไปโอชาร์ช่วยลดปริมาณสารมลพิษในดินสำหรับการดูดซึมของพืช ในขณะที่พืชที่ปลูกในดินที่ไม่เติมไบโอชาร์มีการดูดซึมของสารกำจัดศัตรูพืชเพิ่มขึ้น ถ้าเพิ่มความเข้มข้นของไบโอชาร์ก็จะสามารถดูดซับสารพิษได้มากขึ้น ไบโอชาร์ที่มีขนาดอนุภาคเล็กจะมีพื้นที่ผิวมากและกำจัดมลพิษได้ดีมากขึ้นและใช้เวลากำจัดน้อยลง

5.1.2. สารมลพิษอนินทรีย์

สารก่อมลพิษอนินทรีย์เป็นพิษและไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพเมื่อมีความเข้มข้นสูง เช่น โลหะ ดังนั้นจึงเป็นภัยคุกคามร้ายแรงต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม สารก่อมะเร็งและเป็นพิษมากขึ้นคือ โลหะหนัก เช่น ทองแดง สังกะสี แคดเมียม ตะกั่ว นิกเกิลและปรอท ซึ่งมีการปล่อยสารมลพิษ อนินทรีย์เหล่านี้สู่สิ่งแวดล้อมจากของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมหรือน้ำเสียในเขตเทศบาลเมืองต่าง ๆ ไบโอชาร์ผลิตที่อุณหภูมิต่ำเหมาะสำหรับดูดซับสารปนเปื้อน อนินทรีย์เนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนอินทรีย์และมีรูพรุนสูง กลไกหลักในการกำจัดคือ การแลกเปลี่ยนไอออนโดยเฉพาะโลหะหนัก นอกจากนี้ ไบโอชาร์ยังมีสมบัติการตรึงโลหะซึ่งเกิดจากหมู่ฟังก์ชันพื้นผิว pH และความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก

การวิเคราะห์เอกลักษณ์ของไบโอชาร์ด้วยเทคนิค SEM, FTIR, TEM และ XRD แสดงให้เห็นว่าไบโอชาร์มีประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักสูง ศักย์ไฟฟ้าซีตาและความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของไบโอชาร์จะลดลงเมื่อ pH ของดินเพิ่มขึ้น ดินที่แก้ไขด้วยไบโอชาร์จะมีศักยภาพในการตรึงโลหะหนักมากขึ้น เช่น ความเข้มข้นของโลหะหนักพวก ตะกั่ว แคดเมียม และทองแดง มีแนวโน้มลดลงในดินที่ผ่านการปรับปรุงด้วยไบโอชาร์ วัสดุชีวมวลที่ใช้ในการผลิตไบโอชาร์เพื่อขจัดมลพิษอนินทรีย์ ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร เช่น ซังข้าวโพด หัวบีตน้ำตาล ฟางถั่วเหลือง หญ้าสวิตช์ ฯลฯ และ ของเสียจากสัตว์และกากตะกอนน้ำเสีย ในบรรดาโลหะหนัก ทองแดงมีดึงดูดได้ดีกับหมู่ฟังก์ชัน -OH และ -COOH และการกำจัดขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวลและ pH เป็นหลัก โดยที่ pH 6.0 – 7.0 การกำจัดจะเกิดจากการแลกเปลี่ยนไอออน ในขณะที่ pH ในช่วง 7.0 – 9.0 กลไกการกำจัดจะเกิดจากสารเชิงซ้อนบนพื้นผิวและการดึงดูดด้วยไฟฟ้าสถิต เช่น การกำจัดโลหะโครเมียมมีค่าสูงสุดที่ pH 2.0 ส่วนการกำจัดตะกั่วพบสูงสุดที่ pH 5.0 และเมื่อ pH สูงขึ้นความสามารถในการละลายของโลหะจะลดลงซึ่งขัดขวางการเคลื่อนที่ของโลหะในดิน

นอกจากใช้ไบโอชาร์เป็นวัสดุดูดซับเพื่อขจัดมลพิษอินทรีย์ในดินแล้ว ยังสามารถใช้กำจัดมลพิษอนินทรีย์ออกจากสภาพแวดล้อมที่เป็นน้ำได้ด้วย ไบโอชาร์มีสมบัติในการกำจัดสารมลพิษที่ละลายในน้ำใต้ดิน เช่น สามารถกำจัดยูเรเนียมออกจากน้ำใต้ดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด แต่ปริมาณของไบโอชาร์เป็นปัจจัยสำคัญสุด งานวิจัยจำนวนมากรายงานว่าการเพิ่มปริมาณไบโอชาร์ช่วยเพิ่มการกำจัดโลหะหนัก นอกจากนี้ ความพรุนของ ไบโอชาร์ยังส่งผลต่อการดูดซับโลหะด้วย หมู่ฟังก์ชันที่รับผิดชอบในการกำจัดตะกั่ว (Pb) และโครเมียม (Cr) คือ ไฮดรอกซิลและคาร์บอกซิเลต มีการแข่งขันสำหรับการจับโลหะระหว่างโลหะต่าง ๆ เกิดขึ้นเนื่องจากหมู่ฟังก์ชันสำหรับการดูดซับโลหะมีความเหมือนกันทางเคมี ผลกระทบของการตรึงโลหะหนักและสารปนเปื้อนอนินทรีย์บนไบโอชาร์ในดินยังคงต้องได้รับการศึกษาต่อไป [27]

5.2. การจัดการของเสียและการบำบัดน้ำเสีย

สารประกอบเคมีสังเคราะห์จำนวนมากมีความทนทานต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ สารเคมีสังเคราะห์เหล่านี้ก่อให้เกิดมะเร็งในมนุษย์ [28] และเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ พืชและสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ ในสิ่งแวดล้อม การย่อยสลายสารประกอบ bio-recalcitrant สามารถทำได้โดยใช้กระบวนการที่เรียกว่า catalytic ozonation process (COP) [29] ถ่านไบโอชาร์ได้มาจากสารชีวมวลที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนและมีหมู่ฟังก์ชัน เช่น ฟีนอลิกและไฮดรอกซิล ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาต้นทุนต่ำ [30] ในการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ที่มีความทนทาน ได้แก่ สีย้อมรีแอกทีฟ 198 สีแดง ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาโอโซน

ไบโอชาร์เป็นวัสดุของแข็งที่มีพื้นที่ผิวและรูพรุนสูงสมบัติเหล่านี้จึงทำให้นำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียโดยจะเกิดการเกาะกลุ่มกันของมลพิษบนพื้นผิวของไบโอชาร์ทำให้น้ำเสียสะอาดขึ้น มีรูปแบบการใช้วัสดุคาร์บอนและของเสียชีวภาพ

หยาบในการบำบัดน้ำเสีย นอกจากนี้ยังพบว่าการบำบัดน้ำเสียด้วยไบโอชาร์จะดีกว่าการใช้ถ่านกัมมันต์และยังใช้พลังงานในการผลิต (6.1 MJ/kg) ต่ำกว่าการผลิตถ่านกัมมันต์ (97 MJ/kg) ดังนั้นไบโอชาร์จึงน่าสนใจมากสำหรับใช้งานด้านการกำจัดสารพิษในน้ำและน้ำเสีย ซึ่งก็ต้องพิจารณาเรื่องการปล่อยแก๊สเรือนกระจก การใช้พลังงานและต้นทุนในการผลิตด้วย [31]

5.3. การกักเก็บคาร์บอน

การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศทำให้เกิดความกังวลมากขึ้นในการลดการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) สู่ชั้นบรรยากาศ ดินมีบทบาทสำคัญในวัฏจักรคาร์บอนที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ การกักเก็บคาร์บอนเป็นวิธีที่มีแนวโน้มในการลดการปล่อย CO_2 ในดิน [32] ไบโอชาร์แทบจะไม่ถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ได้เนื่องจากมีโครงสร้างแอโรแมติก ดังนั้นไบโอชาร์จึงมีความได้เปรียบในการกักเก็บคาร์บอนในดิน การทำให้อินทรียวัตถุในดินกลายเป็นแร่จะพบมากในดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ และการเกิดเป็นแร่คาร์บอนจะสูงในดินที่มีปริมาณคาร์บอนสูงเมื่อเทียบกับดินที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำ

ปริมาณคาร์บอนในถ่านไบโอชาร์สามารถจำแนกได้ 2 ประเภท คือ คาร์บอนที่เคลื่อนที่ได้และเคลื่อนที่ไม่ได้ โดยคาร์บอนที่เคลื่อนที่ได้จะถูกใช้ได้ง่ายโดยจุลินทรีย์ในระหว่างที่มีการใช้ไบโอชาร์ซึ่งส่งผลให้มีการเกิดแร่คาร์บอนเพิ่มขึ้นในระยะเริ่มแรก ดังนั้นไบโอชาร์จึงช่วยคืนแร่คาร์บอน ในทางตรงกันข้าม คาร์บอนที่ไม่เคลื่อนที่จะปรากฏในดินเป็นเวลานานกว่า [33] ดังนั้นการตรึงคาร์บอนด้วยการใช้ไบโอชาร์จึงสูงกว่าคาร์บอนที่ปล่อยออกมาเนื่องจากการทำให้เกิดแร่คาร์บอนชนิดเคลื่อนที่ได้ อิทธิพลของไบโอชาร์ต่อการกักเก็บคาร์บอนยังไม่ชัดเจน ผลที่ได้จะแตกต่างกันไปตามประเภทของสารชีวมวลและสภาวะของไพโรไลซิส เนื่องจากสภาวะไพโรไลซิสมีผลกระทบอย่างมากต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของไบโอชาร์จึงจำเป็นต้องกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะปฏิกิริยาและอิทธิพลของไบโอชาร์ต่อการกักเก็บคาร์บอน

5.4. การควบคุมมลพิษทางอากาศ

มีรายงานการศึกษาเกี่ยวกับชีวมวล เช่น กากตะกอนน้ำเสียและฟางข้าวที่ใช้ผลิตถ่านไบโอชาร์และใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำโดยใช้แอมโมเนียเป็นตัวรีดิวซ์ ไบโอชาร์สามารถถูกดัดแปรทางกายภาพหรือทางเคมีได้ โดยการกระตุ้นทางเคมีจะให้ประสิทธิภาพการกำจัดที่สูงกว่าการกระตุ้นทางกายภาพ สิ่งนี้บ่งชี้ว่าสมบัติทางเคมี เช่น หมู่ฟังก์ชัน ตำแหน่งดูดซับเป็นปัจจัยหลักในการกำจัดที่สูงขึ้นภายใต้การเร่งปฏิกิริยาของไบโอชาร์จะมีปล่อยซัลเฟตละอนุมูลอิสระออกมา พื้นผิวของไบโอชาร์ที่เป็นออกซิเจนรวมถึงสารเชิงซ้อนของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ตอบสนองต่างกันเนื่องจากไบโอชาร์สารเชิงซ้อนจะปรับปรุงกิจกรรมการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา [34]

5.5. การดูดซับธาตุอาหารและปุ๋ยปลดปล่อยช้า

งานวิจัยจำนวนมากแสดงให้เห็นว่าไบโอชาร์มีศักยภาพในการดูดซับธาตุอาหาร [35] [36] ไบโอชาร์จากไม้ไผ่ซึ่งผลิตที่อุณหภูมิ 900 °C มีความสามารถในการดูดซับไนเตรตประมาณ 1.2 mg g^{-1} ซึ่งสูงกว่าถ่านกัมมันต์ (0.9 mg g^{-1}) [3] อย่างไรก็ตาม ความสามารถในการดูดซับธาตุอาหารมีความเกี่ยวข้องอย่างสูงต่อกับสมบัติของไบโอชาร์ ซึ่งประกอบด้วย pH หมู่ฟังก์ชันกรดบนพื้นผิว และการแลกเปลี่ยนไอออน [37] [38] ดังนั้นจึงสำคัญมากในการทำความเข้าใจกลไกในการดูดซับธาตุอาหาร กลไกที่อธิบายความสามารถในการดูดซับของสารที่เป็นขั้วและไม่เป็นขั้วจะเกี่ยวข้องกับการดูดซับทางเคมี (chemisorption) ซึ่งประกอบด้วย hydrophobic bonding, **π-π** electron donor-acceptor interactions ที่เกิดจากโครงสร้างแอโรแมติกที่หลอมเชื่อมกัน และพันธะไฮโดรเจนที่ไม่ปกติแบบอ่อน [3]

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเรื่องการประยุกต์ใช้ไบโอชาร์เป็นปุ๋ยปลดปล่อยช้า (slow-release fertilizer) [39] ทั้งนี้เพราะไบโอชาร์ไม่เพียงแต่จะดูดซับสารได้เท่านั้นแต่ยังมีสมบัติในการคายการดูดซับได้อีกด้วย เนื่องจากมีกระบวนการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับแร่ธาตุอาหาร การควบคุมความเข้มข้นของธาตุอาหารในดิน การเพิ่มธาตุอาหารในระบบชีวภาพ โดยต้องพิจารณาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการปลดปล่อยธาตุอาหาร เช่น ชนิดของดิน วัตถุดิบ สภาวะไพโรไลซิส และการประยุกต์ใช้ไบโอชาร์ด้วย มีงานวิจัยรายงานว่า ดินดำที่ผสมไบโอชาร์ 0, 1, 5 และ 10% ปลดปล่อยธาตุฟอสพอรัสได้เท่ากับ 36, 37, 39 และ 41% ตามลำดับ นอกจากนี้ พบว่า Ingá biochar ซึ่งเตรียมผ่านไพโรไลซิสแบบช้าที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 °C ปลดปล่อยฟอสฟอรัสที่ 32, 28 และ 69 mg kg^{-1} ตามลำดับ [3]

ดังนั้นไบโอชาร์จึงมีศักยภาพสูงในการใช้เป็นปุ๋ยปลดปล่อยช้าและเพื่อจัดการธาตุอาหารในดินให้ดียิ่งขึ้น

เพื่อให้ใช้ประโยชน์สูงสุดจำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติมโดยมุ่งเน้นไปที่วิธีการที่สามารถวัดปริมาณธาตุอาหารซึ่งปลดปล่อยออกมาจากไบโอชาร์และดิน เช่น การวิเคราะห์ไอโซโทป [3]

นอกจากนี้ ไบโอชาร์ยังมีความสามารถในการดูดซับยาฆ่าแมลงและสารเคมีที่ตกค้างอยู่ในดินเอาไว้ในโครงสร้างได้อีกด้วย เนื่องจากมีพื้นที่ผิวและรูพรุนสูง [40]

5.6. การปรับปรุงและฟื้นฟูดิน

ไบโอชาร์ถูกนำมาใช้เพื่อแก้ไขมลภาวะของสารมลพิษอินทรีย์และโลหะหนักในดิน การฟื้นฟูดินด้วยไบโอชาร์ส่วนใหญ่ผ่านการดูดซับ [41] กลไกการดูดซับไบโอชาร์รวมถึงความซับซ้อนของพื้นผิว พันธะไฮโดรเจน แรงดึงดูดของไฟฟ้าสถิต อันตรกิริยาของกรด-เบส [42] ไบโอชาร์ยังสามารถดูดซับโคลมาโซนและบิสไพริแบคโซเดียมในดินจึงช่วยลดการชะล้างของโคลมาโซนและบิสไพริแบคโซเดียม [43] จากการเปรียบเทียบ [44] พบว่าการเติมไบโอชาร์ไม่มีผลต่อการชะล้างของไกลโฟเสตและคลอร์ไพริฟอส ความคลาดเคลื่อนนี้อาจเกิดจากสมบัติทางเคมี/กายภาพที่แตกต่างกันของสารก่อมลพิษ การกำจัดโพลีไซคลิกแอโรแมติกไฮโดรคาร์บอน (PAHs) อย่างมีนัยสำคัญนั้นพบได้หลังจากการเติมถ่านไบโอชาร์ที่ได้จากขี้เลื่อยและฟางข้าวสาลี แต่การกำจัด PAHs ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเติมโซเดียมเอไซด์ลงในดิน แสดงว่าการย่อยสลายทางชีวภาพมีบทบาทสำคัญในการย่อยสลาย PAHs การเติมไบโอชาร์สามารถส่งเสริมการทำงานของจุลินทรีย์ในดิน PAHs ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมีความต้านทานต่อการย่อยสลายทางชีวภาพได้สูงกว่า PAHs ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น PAH วงแหวนสามและสี่

Figure 12 Environmental applications of biochar [25]-[32]

6. ความกังวลด้านสิ่งแวดล้อมของไบโอชาร์

นอกจากการส่งเสริมการใช้ไบโอชาร์อย่างกว้างขวางแล้ว เราก็ควรให้ความสนใจผลกระทบด้านลบที่มีต่อสิ่งแวดล้อมด้วย ความเสถียรเป็นหนึ่งในสมบัติสำคัญที่จะต้องพิจารณาเมื่อนำไบโอชาร์ไปใช้กับสิ่งแวดล้อม อย่างที่ทราบกันดีไบโอชาร์ส่วนใหญ่จะประกอบด้วยโครงสร้างคาร์บอน โดยทั่วไปแล้วความเสถียรของไบโอชาร์ หมายถึง ความเสถียรของโครงสร้างคาร์บอน ความเป็นแอโรแมติกและระดับความเป็นแอโรแมติกเป็นตัวบ่งชี้โครงสร้างคาร์บอนของไบโอชาร์ อย่างไรก็ตามความเสถียรของไบโอชาร์ยังคงต้องให้ความสนใจเพราะไบโอชาร์ที่ต่างกันจะมีสมบัติทางเคมีกายภาพต่างกัน

มีรายงานเกี่ยวกับการละลายของสารอินทรีย์ออกจากไบโอชาร์ในรูปของสารเชิงซ้อนโลหะหนักเนื่องจากความไม่เสถียรของไบโอชาร์ และสารอินทรีย์นั้นอาจยังคงมีความเป็น แอโรแมติก ความเสถียรและความต้านทานสูง เมื่อนำเอาไบโอชาร์ไปใช้ในด้านการบำบัดน้ำและน้ำเสีย ปริมาณคาร์บอนในแหล่งน้ำอาจเพิ่มขึ้นเนื่องจากการปลดปล่อยคาร์บอนจากไบโอชาร์ นอกจากนี้ ไบโอชาร์จะประกอบด้วยมีโลหะหนักโดยเฉพาะที่ได้ไบโอชาร์ที่ได้จากกากตะกอน ซึ่งโลหะเหล่านี้อาจถูกชะล้างในระหว่างกระบวนการบำบัดน้ำและน้ำเสียทำให้เกิดมลพิษจากโลหะหนัก และเมื่อใช้ไบโอชาร์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ความเสถียรของตัวเร่งปฏิกิริยามักจะลดลงหลังจากใช้งานไปหลายรอบ ความเสียหายของโครงสร้างของไบโอชาร์อาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ความเสถียรของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง ดังนั้นความเสถียรของถ่านไบโอชาร์จึงมีการเชื่อมโยงโดยตรงกับคุณภาพน้ำและการบำบัดน้ำเสีย

โดยสรุปความเสถียรของไบโอชาร์มีผลสำคัญต่อการประยุกต์ด้านสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อตรวจสอบความเสถียรของไบโอชาร์ในอนาคต จากการพิจารณาว่าสภาวะไพโรไลซิสส่งผลต่อปริมาณคาร์บอนและโครงสร้าง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาความสัมพันธ์ระหว่างความเสถียรของไบโอชาร์กับสภาวะไพโรไลซิส

นอกจากความเสถียรแล้ว ยังควรคำนึงถึงความเป็นพิษที่อาจเกิดขึ้นจากไบโอชาร์ต่อจุลินทรีย์ด้วย [45] มีรายงานว่า ไบโอชาร์ในปริมาณต่ำส่งเสริมการทำงานของเอนไซม์ของจุลินทรีย์ในดิน ซึ่งบ่งชี้ว่าไบโอชาร์ในปริมาณต่ำไม่มีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ แต่ทั้งนี้ก็ขึ้นกับชนิดชีวมวลที่นำมาเตรียมเป็นไบโอชาร์ด้วย เช่น ไบโอชาร์จากไม้ไผ่มีความเป็นพิษต่อเซลล์ต่ำ ในขณะที่ไบโอชาร์ที่ได้จากต้นยาสูบในปริมาณสูงทำให้เกิดพิษต่อเซลล์และพันธุกรรมที่เห็นได้ชัด

7. แนวโน้มในอนาคต

แม้ว่าไบโอชาร์จะถูกนำไปประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ มากมาย [13] [46] [47] โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในด้านการเกษตร และการปรับปรุงดินให้มีความสามารถในการตรึงคาร์บอนให้ดียิ่งขึ้น [48] และยังมีธาตุอาหารที่สำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืชอีกด้วย [49] อย่างไรก็ตาม ไบโอชาร์เองก็ยังมีข้อจำกัดหลายด้านเนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความพรุนสูงและมีความหนาแน่นต่ำกว่าดินถึง 2 เท่า จึงทำให้ดินมีความหนาแน่นลดลงได้ซึ่งเรียกว่า อิทธิพลของการเจือจาง (dilution effect) และยังทำให้ดินเกิดการจับตัวกันเป็นเม็ดดินได้อีกด้วย [50] นอกจากนี้ ปริมาณของเถ้าและสารระเหยที่อยู่ในไบโอชาร์อาจทำให้ดินมีค่า pH ที่สูงขึ้นจนส่งผลให้พืชขาดธาตุอาหารสำคัญได้ [51] เนื่องจากธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชส่วนใหญ่จะมีประโยชน์เมื่อมี pH อยู่ในช่วงที่เป็นกลาง (pH ~ 6.5-7.5) [52] และถึงแม้วัสดุที่ใช้ในกระบวนการผลิตนั้นจะหาได้ง่ายและราคาไม่แพง เช่น ฟางข้าว (600–800 บาท/ตัน) เปลือก/ซังข้าวโพด (250-450 บาท/ตัน) ขี้เลื่อย (650-850 บาท/ตัน) แกลบ (900–1,100 บาท/ตัน) เศษไม้ (400-800 บาท/ตัน) [53] แต่ในการผลิตแต่ละครั้งนั้นให้ไบโอชาร์ในปริมาณต่ำ [50] จึงต้องทำการผลิตหลายครั้งเพื่อให้ได้ปริมาณเพียงพอต่อความต้องการใช้ ซึ่งอาจเป็นการเพิ่มต้นทุนการผลิตที่ส่งผลให้ไบโอชาร์ที่ได้มีราคาที่สูงขึ้นนั่นเอง แต่ถึงอย่างไร เมื่อเทียบกับราคาของสารเคมีที่ใช้ในการดูดซับ เช่น 98.5% อะคริลาไมด์ (8937.17 บาท/2.5 กิโลกรัม) [54] ก็ยังถือว่ามีราคาที่ถูกกว่ามาก

ในปัจจุบัน การศึกษาผลกระทบของไบโอชาร์ต่อสภาพแวดล้อมส่วนมากยังคงทำแค่ภายในห้องปฏิบัติการซึ่งสามารถควบคุมตัวแปรต่าง ๆ ได้ง่าย แต่ในสภาพแวดล้อมจริงนั้นจะมีความซับซ้อนกว่ามาก ผลกระทบของไบโอชาร์ที่มีต่อสิ่งแวดล้อมจึงยังไม่เป็นที่เข้าใจมากนักเนื่องจากปัจจัยแวดล้อมของสภาวะจริงนั้นไม่สามารถควบคุมได้หรือควบคุมได้ยาก

ดังนั้น ในอนาคตจึงคาดว่าจะต้องมีการทำการศึกษาถึงผลกระทบของไบโอชาร์ในสภาวะแวดล้อมจริง เช่น ผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในดิน ความสามารถในการตรึงคาร์บอนในดิน และอื่น ๆ ก่อนที่จะประยุกต์ใช้ในระดับที่กว้างขวางต่อไป นอกจากนี้ สำหรับการประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรม สภาวะการเตรียมไบโอชาร์จำเป็นต้องได้รับการพัฒนาตามสภาวะการใช้งานในจุดประสงค์ด้านสิ่งแวดล้อมที่ต่างกัน เพื่อส่งเสริมการประยุกต์ใช้งานไบโอชาร์ในด้านสิ่งแวดล้อม มีหลายประเด็นที่จำเป็นต้องได้รับศึกษา

- เพื่อพัฒนาวิธีปรับแต่งไบโอชาร์ด้วยหลายวิธีผสมกัน
- เพื่อแสดงผลที่แท้จริงของไบโอชาร์ต่อสิ่งแวดล้อม
- เพื่อหาความเสถียรของไบโอชาร์ เช่น การปลดปล่อย PAHs และ โลหะหนัก
- เพื่อหากลไกการกระตุ้นของซัลเฟตด้วยไบโอชาร์
- เพื่อหาประสิทธิภาพของไบโอชาร์ในการบำบัดน้ำเสีย
- เพื่อศึกษาวิธีการเตรียมไบโอชาร์ในปริมาณมาก การประยุกต์ใช้ที่มีความเสถียร การนำกลับมาใช้ซ้ำ และการบำบัดหลังการใช้งาน
- เพื่อปรับปรุงความสามารถในการดูดซับให้มากขึ้น ไบโอชาร์ไฮโดรเจล (ไฮโดรเจลที่เตรียมโดยเติมไบโอชาร์เข้ากับโครงสร้างโพลิเมอร์ของไฮโดรเจล) ควรจะได้รับการศึกษามากขึ้นเนื่องจากมีต้นทุนต่ำและมีความสามารถในการดูดซับสูงซึ่งเหมาะสำหรับการขจัดสิ่งปนเปื้อนออกจากน้ำเสียและการกำจัดแอมโมเนีย-ไนโตรเจนจากน้ำเสียเนื่องจากเป็นเรื่องน่าสนใจใหม่ และควรศึกษาด้านการกำจัดสารอาหารและสารประกอบประจุลบโดยใช้ไบโอชาร์เพราะงานวิจัยด้านนี้ยังมีน้อย

8. บทสรุป

ไบโอชาร์ คือ ถ่านชีวมวล ซึ่งแตกต่างจากถ่านเชื้อเพลิงและถ่านทั่วไป (Char) ที่ใช้อุณหภูมิในการเผาสูงกว่า 700°C แต่ไบโอชาร์จะใช้อุณหภูมิในการเผาที่ต่ำกว่า จึงทำให้ไบโอชาร์มีธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชและสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก สามารถกักเก็บคาร์บอนลงในดินและช่วยปรับปรุงสภาพทางกายภาพของดินได้ การเตรียมไบโอชาร์นั้นสามารถเตรียมได้จากสารชีวมวลหลากหลายชนิดผ่านกระบวนการไพโรไลซิส ไบโอชาร์ที่สังเคราะห์ได้นั้นจะมีพื้นที่ผิวและรูพรุนสูงและประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ เช่น หมู่ไฮดรอกซิลและหมู่คาร์บอกซิล เป็นต้น ซึ่งเหมาะสมอย่างมากในการประยุกต์ใช้ถ่านไบโอชาร์ในการกักเก็บน้ำและธาตุอาหารในดินให้กับพืชได้เป็นอย่างดี การปรับปรุงดิน การดูดซับของเสียในดินและน้ำ ตลอดจนการปลดปล่อยปุ๋ยละลายช้า เป็นต้น จึงนับว่าเป็นวัสดุที่มีความพิเศษมากเนื่องจากมีต้นทุนที่ต่ำมากและช่วยเปลี่ยนของเสียทางการเกษตรให้เป็นวัสดุที่คุณค่ามากขึ้นได้ อย่างไรก็ตาม หากต้องการให้ไบโอชาร์มีคุณสมบัติพิเศษมากขึ้น ก็สามารถปรับแต่งคุณสมบัติของไบโอชาร์ที่มีสมบัติเฉพาะตามต้องการได้โดยการดัดแปรถ่านไบโอชาร์ด้วยเทคนิคที่หลากหลาย เช่น การดัดแปรด้วยกรด การดัดแปรด้วยด่าง การดัดแปรด้วยสารออกซิไดส์ และ การดัดแปรด้วยเกลือโลหะ

หรือโลหะออกไซด์ เป็นต้น ด้วยสมบัติที่ดีมากดังกล่าวจึงทำให้ไบโอชาร์เป็นตัวเลือกที่สำคัญและนิยมใช้อย่างแพร่หลายสำหรับการกำจัดมลพิษในสิ่งแวดล้อมและสิ่งปนเปื้อนในดิน นอกจากนั้นแล้ว ไบโอชาร์ยังให้ประโยชน์ในด้านการเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ให้แก่ดินและเร่งการเจริญเติบโตของพืชอีกด้วย

แม้ว่าข้อจำกัดด้านประสิทธิภาพของไบโอชาร์ในปัจจุบันจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารชีวมวลและสภาวะของกระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งคาดว่าในอนาคตอาจมีการพัฒนาไบโอชาร์ที่จะเน้นไปที่ทางด้านการเพิ่มสมบัติเฉพาะอื่น ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการประยุกต์ใช้กับงานที่หลากหลายมากยิ่งขึ้น เช่น เพื่อพัฒนาวิธีการดัดแปรหลายแบบผสมผสานของไบโอชาร์ เพื่อแสดงให้เห็นเพิ่มเติมถึงผลกระทบที่แท้จริงของไบโอชาร์ต่อสิ่งแวดล้อม และ เพื่อตรวจสอบความเสถียรของไบโอชาร์ เช่น PAHs ที่ปลดปล่อยออกมาและโลหะหนัก เป็นต้น

9. References

[1] Renella, G., Landi, L. and Nannipieri, P. 2004. Degradation of low molecular weight organic acids complexed with heavy metals in soil. **Geoderma.** 22(2-4): 311-315.

[2] Tang, X. and et al. 2010. Heavy metal and persistent organic compound contamination in soil from Wenling: An emerging e-waste recycling city in Taizhou area, China. **Journal of Hazardous Materials.** 173(1-3): 653-660.

[3] Ding, Y. and et al. 2016. Biochar to improve soil fertility. A review. **Agronomy for Sustainable Development.** 36: 36.

[4] Rawat, J., Sexena, J. and Sanwal, P. 2018. Biochar: A sustainable approach for improving plant growth and soil properties In: Abrol, V. and Sharma, P. (eds.) **Biochar - An Imperative Amendment for Soil and the Environment,** London: IntechOpen.

[5] Chen, Y. and et al. 2017. The structure evolution of biochar from biomass pyrolysis and its correlation with gas pollutant adsorption performance. **Bioresource Technology.** 246: 101-109.

[6] Yaashikaaa, P.R. and et al. 2020. A critical review on the biochar production techniques, characterization, stability and applications for circular bioeconomy. **Biotechnoogy Reports.** 28: e00570.

[7] Cantrell, K.B. and et al. 2012. Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar. **Bioresource Technology.** 107: 419-428.

[8] Wei, J. and et al. 2019. Assessing the effect of pyrolysis temperature on the molecular properties and copper sorption capacity of a halophyte biochar. **Environmetal Pollution.** 251: 56-65.

[9] Tripathi, M., Sahu, J. N. and Ganesan, P. 2015. Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review. **Renewable and Sustainable Energy Review.** 55: 467-481.

[10] Chen, B., Chen, Z. and Lv, S. 2011. A novel magnetic biochar efficiently sorbs organic pollutants and phosphate. **Bioresource Technology.** 102(2): 716-723.

[11] Lu, G.Q. and et al. 1995. Surface area development of sewage sludge during pyrolysis. **Fuel.** 74(3): 344-348.

[12] You, S. and et al. 2018. Towards practical application of gasification: a critical review from syngas and biochar perspectives. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology.** 48(22-24): 1165-1213.

[13] Wang, J. and Wang, S. 2019. Preparation, modification and environmental application of biochar: A review. **Journal of Cleaner Production.** 227: 1002-1022.

[14] Brewer, C.E. and et al. 2014. New approaches to measuring biochar density and porosity. **Biomass and Bioenergy.** 66: 176-185.

[15] Li, H. and et al. 2017. Mechanisms of metal sorption by biochars: Biochar characteristics and modifications. **Chemosphere.** 178: 466-478.

[16] Wang, B. and et al. 2021. Environmental-friendly coal gangue-biochar composites reclaiming phosphate from water as a slow-release fertilizer. **Science of the Total Environment.** 758: 143664.

[17] Kim, K.H. and et al. 2012. Influence of pyrolysis temperature on physicochemical properties of biochar obtained from the fast pyrolysis of pitch pine (*Pinus rigida*). **Bioresource Technology.** 118: 158-162.

[18] Dhar, S.A., Sakib, T.U. and Hilary, L.N. 2022. Effects of pyrolysis temperature on production and physicochemical characterization of biochar derived from coconut fiber biomass through slow pyrolysis process. **Biomass Conversion and Biorefinery.** 12: 2631-2647.

[19] Usman, A.R.A. and et al. 2015. Biochar production from date palm waste: Charring temperature induced changes in composition and surface chemistry. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis.** 115: 392-400.

[20] Yao, Y. and et al. 2014. Characterization and environmental applications of clay-biochar composites. **Chemical Engineering Journal.** 242: 136-143.

[21] Mondal, S. and et al. 2016. Biosorptive uptake of ibuprofen by steam activated biochar derived from mung bean husk: Equilibrium, kinetics, thermodynamics, modeling and eco-toxicological studies. **Journal of Environmental Management.** 182: 581-594.

[22] Wiedemeier, D.B. and et al. 2014. Aromaticity and degree of aromatic condensation of char. **Organic Geochemistry.** 78: 135-143.

[23] Synchrotron Light Research Institute. 2018. BEAMLINE 5.3: XPS **X-Ray Photoemission spectroscopy.** https://www.slri.or.th/th/bl5-3-xps.html. Accessed 22 August 2022. (*in Thai*)

[24] Leng, L. and et al. 2019. Biochar stability assessment methods: A review. **Science of the Total Environment.** 647: 210-222.

[25] Cross, A. and Sohi, S.P. 2013. A method for screening the relative long-term stability of biochar. **GCB Bioenergy.** 5(2): 215-220.

[26] Hemavathy, R.V. and et al. 2020. Adsorptive separation of Cu(II) ions from aqueous medium using thermally/chemically treated Cassia fistula based biochar. **Journal of Cleaner Production.** 249: 119390.

[27] Yaashikaa, P.R. and et al. 2019. Modelling on the removal of Cr(VI) ions from aquatic system using mixed biosorbent (*Pseudomonas stutzeri* and acid treated Banyan tree bark). **Journal of Molecular Liquids.** 276: 362-370.

[28] Karukstis, K.K. and et al. 1988. Quenching of chlorophyll fluorescence by substituted anthraquinones. **Biochimica et Biophysica Acta - Bioenergetics.** 932: 84-90.

[29] Derrouiche, S. and et al. 2013. Process design for wastewater treatment: Catalytic ozonation of organic pollutants. **Water Science and Technology.** 68(6): 1377-1383.

[30] Lee, J., Kim, K.-H. and Kwon, E. E. 2017. Biochar as a Catalyst. **Renewable and Sustainable Energy Reviews.** 77: 70-79.

[31] Deng, Y., Zhang, T. and Wang, Q. 2017. Biochar adsorption treatment for typical pollutants removal in livestock wastewater: a review. In: Huang, W.J. (ed.) **Engineering Application of Biochar,** London: IntechOpen.

[32] Mendez, A. and et al. 2012. Effects of sewage sludge biochar on plant metal availability after application to a Mediterranean soil. **Chemosphere.** 89(11): 1354-1359.

[33] Puga, A.P. and et al. 2015. Biochar application to a contaminated soil reduces the availability and plant uptake of zinc, lead and cadmium. **Journal of Environmental Management.** 159: 86-93.

[34] Yu, X.Y., Ying, G.G. and Kookana, R.S. 2009. Reduced plant uptake of pesticides with biochar additions to soil. **Chemosphere.** 76(5): 665-671.

[35] Gwenzi, W. and et al. 2018. Synthesis and nutrient release patterns of a biochar-based N–P–K slow-release fertilizer. **International Journal of Environment Science and Technology.** 15(2): 405-414.

[36] Chen, S. and et al. 2018. Preparation and characterization of slow-release fertilizer encapsulated by biochar-based waterborne copolymers. **Science of Total Environment.** 615: 431-437.

[37] Wang, S. and et al. 2022. Application of Biochar for Wastewater Treatment. In: Kapoor, R.T., Treichel, H. and Shah, M.P. (eds.) **Biochar and its Application in Bioremediation,** Singapore: Springer Nature Singapore.

[38] Tomczyk, A., Sokołowska, Z. and Boguta, P. 2020. Biochar physicochemical properties: Pyrolysis temperature and feedstock kind effects. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology.** 19: 191-215.

[39] Wang, C. and et al. 2022. Biochar-based slow-release of fertilizers for sustainable agriculture: A mini review. **Environmental Science and Ecotechnology.** 10: 100167.

[40] Ahmad, M. and et al. 2012. Effects of pyrolysis temperature on soybean stover- and peanut shell-derived biochar properties and TCE adsorption in water. **Bioresource Technology.** 118: 536-544.

[41] Kumuduni, N. and et al. 2022. Prediction of soil heavy metal immobilization by biochar using machine learning. **Environmental Science & Technology.** 56 (7): 4187-4198.

[42] Zheng, W. and et al. 2010. Sorption properties of greenwaste biochar for two triazine pesticides. **Journal of Hazardous Materials.** 181(1-3): 121-126.

[43] Gamiz, B. and et al. 2017. Biochar soil additions affect herbicide fate: Importance of application timing and feedstock species. **Journal of Agricultural Food Chemistry.** 65(15): 3109-3117.

[44] Cederlund, H., Borjesson, E. and Stenstrom, J. 2017. Effects of a wood-based biochar on the leaching of pesticides chlorpyrifos, diuron, glyphosate and MCPA. **Journal of Environmental Management.** 191: 28-34.

[45] Di Dong, C., Chen, C.W. and Hung, C.M. 2017. Synthesis of magnetic biochar from bamboo biomass to activate persulfate for the removal of polycyclic aromatic hydrocarbons in marine sediments. **Bioresource Technology.** 245: 188-195.

[46] Tan X. and et al. 2015. Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions. **Chemosphere.** 125: 70-85.

[47] Lyu, H., Zhang, Q. and Shen, B. 2020. Application of biochar and its composites in catalysis. **Chemosphere.** 240: 124842.

[48] Verheijen, F. and et al. 2010. **Biochar Application to Soils - A Critical Scientific Review of Effects on Soil Properties, Processes and Functions.** Luxembourg: European Commission.

[49] Schmidt, H.P. and et al. 2014. Biochar and biochar-compost as soil amendments to a vineyard soil: Influences on plant growth, nutrient uptake, plant health and grape quality. **Agriculture, Ecosystems & Environment.** 191: 117-123.

[50] Butnan, S. and Vityakon, P. 2018. Amazing biochar and its bipolar effects. **Khon Kaen Agriculture Journal**. 46(6): 1167-1176. (*in Thai*)

[51] Kamprath, E.J. 1971. Potential detrimental effects from liming highly weathered soils to neutrality. **Soil and Crop Science Society of Florida.** 31: 200-203.

[52] Mengel, K. and Kirkby, E.A. 2001. **Principles of Plant Nutrition. 5th edition.** Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

[53] Lampang13 News Online. 2020. **Siam Cement Group (Lumpang) Buys Agricultural Scraps to Solve the Problem of Smoke and to Reduce Pollution from Open Burning.** http://www.lampang13.com/archives/21191. Accessed 25 August 2022.

[54] Acros Organics. 2020. **Chemical Price.** https://www.acros.com/DesktopModules/Acros_Search_Results/Acros_Search_Results.aspxsearch_type=CatalogSearch&SearchString=Acrylamide. Accessed 26 August 2022.