



บทบาทของถ่านชีวภาพต่อการกักเก็บคาร์บอนในดินและการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในพื้นที่เกษตรกรรม

Role of biochar in soil carbon sequestration and mitigation of greenhouse gases emission in agricultural land

ประภา ธารเนตร^{1*}, พันทิภา โพธิ์พันธุ์¹ และ กชกร หล้าพรหม¹

Prapa Taranet^{1*}, Phanthipha Phophan¹ and Kotchaporn Hlaporm¹

¹ กองวิจัยและพัฒนาการจัดการที่ดิน กรมพัฒนาที่ดิน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

¹ Research and Development for Soil Management Division, Land Development Department, Lad Yao Sub-District, Chatuchak District, Bangkok, Thailand 10900

บทคัดย่อ: ถ่านชีวภาพได้รับความสนใจในการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดิน เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความพรุนสูงสามารถดูดซับน้ำ และธาตุอาหารได้ดี ถ่านชีวภาพผลิตจากมวลชีวภาพด้วยกระบวนการไพโรไลซิส หรือการเผาภายใต้สภาวะจำกัดออกซิเจน ซึ่งช่วยลดการสูญเสียคาร์บอนในสถานะก๊าซ ทำให้ถ่านชีวภาพมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบสูง และมีความต้านทานต่อการย่อยสลายจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดิน ด้วยเหตุนี้ ถ่านชีวภาพจึงจัดว่าเป็นวัสดุที่ช่วยกักเก็บคาร์บอน และลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่ชั้นบรรยากาศได้อย่างไรก็ตาม ถ่านชีวภาพไม่ได้จัดว่าเป็นการกักเก็บคาร์บอนจากชั้นบรรยากาศโดยตรง แต่นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนที่กักเก็บไว้ในมวลชีวภาพให้อยู่ในรูปแบบที่เสถียรมากยิ่งขึ้น ซึ่งช่วยในการกักเก็บคาร์บอนในดิน นอกจากนี้ ถ่านชีวภาพช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ และมีเทนซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญ การลดการปลดปล่อยก๊าซเหล่านี้ลงเพียงเล็กน้อยก็ก่อให้เกิดประโยชน์อย่างมากต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนของก๊าซไนตรัสออกไซด์ และก๊าซมีเทนสูงกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 310 และ 25 เท่า ตามลำดับ ด้วยเหตุนี้ ถ่านชีวภาพจึงจัดเป็นตัวเลือกที่เหมาะสมสำหรับการบรรเทาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศผ่านการกักเก็บคาร์บอนในระยะยาว และการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เป็นปัญหาสำคัญของภาวะโลกร้อน

คำสำคัญ: ถ่านชีวภาพ; การกักเก็บคาร์บอนในดิน; การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก

ABSTRACT: Biochar has gained attention for its application as a soil amendment since its high porosity increases the capacity for water and nutrients absorption. Biochar is a carbon rich charcoal-like substance created by thermal decomposition of biomass under limited oxygen conditions, a process known as pyrolysis. This process reduces carbon loss in the gaseous state, resulting in a high carbon concentration, and the structure of biochar has more organized C layers. The biochar products are highly durable when applied to the soil and resistant to soil microbial degradation, as a result it is a viable option for long-term soil carbon sequestration. However, biochar is not considered a direct sequestration of carbon from the atmosphere, but it leads to the conversion of carbon stored in biomass into a more stable form, which contributes to increasing the carbon sequestration in the soil. In addition, biochar has some beneficial properties in reducing emissions of nitrous oxide and methane to the atmosphere, a slight reduction in such emissions could bring significant environmental benefits. This is due to the global warming

* Corresponding author: prapataranet@gmail.com

potential of nitrous oxide and methane is approximately 310 and 25 times higher than that of carbon dioxide. As a result, biochar is a potential material for mitigating climate change through long-term carbon sequestration and reducing greenhouse gas emissions that are a major problem of global warming.

Keywords: biochar; carbon sequestration; greenhouse gases emission

บทนำ

การเพิ่มขึ้นของก๊าซกระจก (greenhouse gas) ในชั้นบรรยากาศโลกเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกสูงขึ้น ซึ่งนำไปสู่การเกิดภาวะโลกร้อน (global warming) และการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (climate change) ของโลก การเพิ่มขึ้นของก๊าซเรือนกระจก โดยส่วนใหญ่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การเผาไหม้เชื้อเพลิง โรงงานอุตสาหกรรม การตัดไม้ทำลายป่า และการเกษตรกรรม เป็นต้น จากการศึกษาการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทย พบว่าภาคเกษตรมีค่าการปลดปล่อยร้อยละ 22.6 ของปริมาณการปล่อยทั้งประเทศ รองจากภาคพลังงานมีค่าร้อยละ 69.6 (สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2553) ทั้งนี้ การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากภาคเกษตรเป็นผลจากกิจกรรมต่างๆ เช่น การใช้ปุ๋ยเคมี (FAO, 2020) การไถพรวนดิน (Sørensen et al., 2014) และการเผาเศษวัสดุเหลือใช้จากภาคการเกษตร (Tubiello et al., 2013) เป็นต้น การส่งเสริมมาตรการที่ช่วยกักเก็บคาร์บอน (carbon sequestration) และลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก (mitigation of greenhouse gas emission) นับเป็นแนวทางสำคัญที่ช่วยบรรเทาภาวะโลกร้อนและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศได้

ถ่านชีวภาพ (biochar) คือวัสดุอินทรีย์ที่อุดมด้วยคาร์บอน ผลิตจากวัสดุธรรมชาติ เช่น ไม้ กิ่งไม้ เปลือกผลไม้ มูลสัตว์ วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร หรือของเสียจากครัวเรือน เป็นต้น โดยผ่านกระบวนการเผาไหม้ภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจนหรือมีออกซิเจนน้อยมาก เรียกว่าการแยกสลายด้วยความร้อนหรือการไพโรไลซิส (pyrolysis) (Masulili et al., 2010; Rawat et al., 2019) ถ่านชีวภาพได้รับความสนใจในการนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดิน ซึ่งการใช้ถ่านชีวภาพจะช่วยปรับปรุงสมบัติทางเคมี กายภาพ และชีวภาพของดิน ซึ่งส่งผลให้ความอุดมสมบูรณ์ของดินและศักยภาพของการผลิตทางการเกษตรของดินเพิ่มขึ้น จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า ถ่านชีวภาพช่วยลดความเป็นกรดของดิน (Fidel et al., 2017) เพิ่มความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหาร เช่น ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม และแคลเซียม เป็นต้น และลดความเป็นพิษของธาตุโลหะบางชนิดในดิน (Harsono et al., 2013) เพิ่มอัตราการแทรกซึมน้ำและการอุ้มน้ำของดิน (Glaser et al., 2002) เป็นแหล่งพลังงานและที่อยู่อาศัยของจุลินทรีย์ในดิน (Lehmann et al., 2011) นอกจากนี้ การใช้ถ่านชีวภาพปรับปรุงดินช่วยในการกักเก็บคาร์บอนและลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ เนื่องจากถ่านชีวภาพมีปริมาณคาร์บอนที่มีความคงทนสูงและสามารถกักเก็บไว้ในดินได้เป็นเวลานาน ซึ่งเป็นผลมาจากการไพโรไลซิสของถ่านชีวภาพช่วยลดการสูญเสียคาร์บอนในสถานะก๊าซ ทำให้ถ่านชีวภาพมีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูง และผลผลิตถ่านที่ได้อุดมไปด้วยคาร์บอนที่ไม่ย่อยสลายตามธรรมชาติโดยง่าย และสามารถกักเก็บไว้ในดินเป็นระยะเวลายาวนานมากขึ้น (Thies and Rillig, 2009; Minasny et al., 2017)

ในปัจจุบัน หน่วยงานในระดับนานาชาติได้มีความพยายามส่งเสริมให้มีการใช้ถ่านชีวภาพเป็นแหล่งกักเก็บคาร์บอนในดินระยะยาว เนื่องจากสมบัติในการต้านทานต่อการย่อยสลายและการมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบที่สูง เมื่อเทียบกับมวลชีวภาพของพืช ซึ่ง Lehmann et al. (2006) รายงานว่าการเปลี่ยนคาร์บอนในมวลชีวภาพเป็นถ่านชีวภาพทำให้เกิดการกักเก็บคาร์บอนได้ สูงถึง 50 เปอร์เซ็นต์ และสามารถอยู่ในดินได้นานนับพันปี ในขณะที่มวลชีวภาพที่เกิดการย่อยสลายและกลายเป็นอินทรีย์วัตถุในสภาพธรรมชาติจะมีปริมาณคาร์บอนเพียง 10-20 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น นอกจากนี้ ยังมีการศึกษาอีกว่า ถ่านชีวภาพช่วยลดการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ (N₂O) ประมาณ 28-80 เปอร์เซ็นต์จากดินที่มีการเพาะปลูก (Cayuela et al., 2014; Cayuela et al., 2015; Rondon et al., 2005) และเพิ่มการดูดซับก๊าซมีเทน (CH₄) ซึ่งเป็นการช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและบรรเทาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศได้อีกด้วย (ฤทัยรัตน์ โพธิ์, 2552) ดังนั้น ถ่านชีวภาพจึงน่าจะเป็นตัวเลือกที่เหมาะสมสำหรับการบรรเทาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศผ่านการกักเก็บคาร์บอนในระยะยาว และการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เป็นปัญหาสำคัญของภาวะโลกร้อน เอกสารวิชาการฉบับนี้เน้นการรวบรวมและนำเสนอผลของถ่านชีวภาพในการกักเก็บคาร์บอนในดินและการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่ชั้นบรรยากาศ รวมถึงข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญในการส่งเสริมการนำถ่านชีวภาพไปใช้ในการจัดการดินและสิ่งแวดล้อม การใช้ถ่าน

ชีวภาพสามารถเพิ่มการกักเก็บคาร์บอนในดินและการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ นอกจากนี้จะทำให้ภาคเกษตรกรรมสามารถปรับตัวและช่วยบรรเทาภาวะโลกร้อนได้แล้ว ยังเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการดินเพื่อการเกษตรอย่างยั่งยืนด้วย

ก๊าซเรือนกระจก การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก และการกักเก็บคาร์บอนในดิน

ก๊าซเรือนกระจก คือก๊าซที่เป็นองค์ประกอบสำคัญของบรรยากาศโลก เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ก๊าซมีเทน (CH₄) ก๊าซไนตรัสออกไซด์ (N₂O) และก๊าซไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (HFC) เป็นต้น ทำหน้าที่ดูดซับคลื่นรังสีความร้อนหรือรังสีอินฟราเรด และช่วยรักษาอุณหภูมิของโลกให้คงที่ หากปราศจากก๊าซเรือนกระจก โลกจะหนาวเย็นจนสิ่งมีชีวิตอยู่อาศัยไม่ได้ แต่การมีก๊าซเรือนกระจกมากเกินไปก็เกิดเหตุให้อุณหภูมิสูงขึ้นถึงระดับเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต (Watson et al., 1992) โดยทั่วไป ก๊าซเรือนกระจกเกิดจากกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ โดยเฉพาะการเผาไหม้เชื้อเพลิง โรงงานอุตสาหกรรม การตัดไม้ทำลายป่า การเน่าสลายของสารอินทรีย์ และจากมูลสัตว์ เมื่อก๊าซเหล่านี้มีภาระสะสมมากขึ้น จะทำให้ชั้นบรรยากาศมีการกักเก็บรังสีความร้อนไว้มากขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกสูงขึ้น และเกิดภาวะโลกร้อน (IPCC, 2006) ในปัจจุบัน หน่วยงานที่เกี่ยวข้องต่างๆ ทั่วโลกได้มีความพยายามหามาตรการเพื่อลดการปลดปล่อยและเพิ่มการกักเก็บก๊าซเรือนกระจกเหล่านี้ออกจากชั้นบรรยากาศ

คณะกรรมการสภาพการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลกนานาชาติระบุว่า ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซเรือนกระจกที่ทำให้เกิดพลังงานความร้อนสะสมในชั้นบรรยากาศของโลกมากที่สุด และยังมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นกว่าก๊าซชนิดอื่นๆ (IPCC, 2021) โดยความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศเพิ่มขึ้นจาก 285 ppm ในช่วงปลายศตวรรษที่ 19 เป็น 366 ppm ในช่วงปลายศตวรรษที่ 20 (พ.ศ. 2531) (IPCC, 2001) ซึ่งความเข้มข้นเฉลี่ยในปัจจุบันมีค่าเท่ากับ 410 ppm (IPCC, 2021) ส่วนก๊าซมีเทนซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากการขุดเจาะแหล่งน้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ การเพาะปลูกข้าว และการปศุสัตว์ มีความเข้มข้นเฉลี่ยเท่ากับ 1,866 ppb (IPCC, 2021) โดยการคาดการณ์ในสามสิบปีข้างหน้า พบว่าการปลดปล่อยก๊าซมีเทนจะเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าของปริมาณในปัจจุบัน สำหรับประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศที่มีการเพาะปลูกข้าวจำนวนมาก มีการคาดการณ์ว่าการปลดปล่อยก๊าซมีเทนมีค่าประมาณ 300-500 ล้านตันต่อปี ทั้งนี้ ก๊าซมีเทนมีศักยภาพในการกักเก็บความร้อนมากกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถึง 21 เท่า (ฤทัยรัตน์ โปธิ, 2552) ในขณะที่ก๊าซไนตรัสออกไซด์ซึ่งเกิดจากหลายกิจกรรมของมนุษย์ เช่น อุตสาหกรรมผลิตเส้นใยไนลอน อุตสาหกรรมเคมี หรือ อุตสาหกรรมพลาสติกบางชนิด เป็นต้น มีความเข้มข้นเฉลี่ยเท่ากับ 332 ppb (IPCC, 2021) ซึ่งก๊าซไนตรัสออกไซด์มีค่าระดับศักยภาพที่ทำให้โลกร้อน (global warming potential (GWP)) ขึ้นเท่ากับ 310 กล่าวคือ ก๊าซไนตรัสออกไซด์ 1 กิโลกรัมทำให้โลกร้อนมากกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถึง 310 เท่า (ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 310 กิโลกรัม) (IPCC, 1996)

การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากภาคการเกษตรมีทั้งก๊าซไนตรัสออกไซด์ มีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ โดยค่าประมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเหล่านี้ในปี พ.ศ. 2548 คิดเป็น 6.1 กิกะตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า เป็นก๊าซมีเทนและไนตรัสออกไซด์ในปริมาณกว่า 3.3 และ 2.8 กิกะตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อปี ในขณะที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีการปล่อยสุทธิเพียง 0.04 กิกะตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อปี โดยการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเกือบสามในสี่มาจาก 2 แหล่งคือ จากการใช้ที่ดินในการเพาะปลูกและการเลี้ยงปศุสัตว์ (รวมทั้งการจัดการมูลสัตว์) โดยเฉพาะก๊าซไนตรัสออกไซด์และก๊าซมีเทน ซึ่งทำให้ภาคการเกษตรเป็นแหล่งปล่อยก๊าซสองชนิดนี้ที่สำคัญที่สุด (ONEP, 2009) การปล่อยก๊าซส่วนที่เหลือมาจากการใช้เครื่องจักรกลในการเกษตร ถึงแม้ภาคเกษตรจะไม่ใช่อะไรแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่ใหญ่ที่สุด แต่ภาคเกษตรกรรมเป็นภาคที่จะได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศมากที่สุด เนื่องจากเป็นภาคที่ประชากรมีฐานะทางเศรษฐกิจที่ด้อยที่สุด ทำให้มีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศสูง นอกจากนี้ ภาคการเกษตรเองมีศักยภาพในการที่จะกักเก็บและลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้จากการจัดการดินทางการเกษตร เช่น การเติมอินทรีย์วัตถุลงดินสำหรับการปรับปรุงดิน เป็นต้น อินทรีย์วัตถุเหล่านี้มีองค์ประกอบของคาร์บอนอยู่เป็นจำนวนมาก (กรมพัฒนาที่ดิน, 2558) ดังนั้น การเพิ่มปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินจึงช่วยกักเก็บคาร์บอนในดินเพิ่มขึ้นและลดปริมาณก๊าซเรือนกระจก

คาร์บอนในดิน (soil carbon) เป็นแหล่งคาร์บอนที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในระบบนิเวศบก ปริมาณของคาร์บอนในดินมีประมาณเป็นสองเท่าของปริมาณคาร์บอนในชั้นบรรยากาศ และสามเท่าที่กักเก็บในมวลชีวภาพของพืช (Lal et al., 2007) การเปลี่ยนรูปก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากบรรยากาศมาเก็บไว้ในแหล่งกักเก็บต่างๆ เช่น มหาสมุทร ป่าไม้ พรรณพืช ดิน และชั้นหิน เป็นต้น ทำให้

สามารถกักเก็บคาร์บอนได้เป็นเวลานาน และช่วยลดอัตราการปล่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศ (IPCC, 2021) นอกจากนี้ อินทรีย์คาร์บอนในดินมีบทบาทสำคัญต่อความอุดมสมบูรณ์ของดินทั้งในระยะสั้นและระยะยาว โดยเป็นแหล่งสำรองธาตุอาหารพืชจากการย่อยสลายของอินทรีย์วัตถุในดิน รวมถึงการเป็นตัวชี้วัดความเสี่ยงต่อมลพิษของดิน โดยทั่วไป พืชมีกระบวนการดูดใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากบรรยากาศผ่านกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง และเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นอินทรีย์คาร์บอน (organic carbon) แล้วกักเก็บในรูปของมวลชีวภาพในเนื้อไม้ (Lal et al., 2007; อัญชัน และคณะ, 2562) เมื่อพืชตายคาร์บอนจะหมุนเวียนลงดินด้วยการย่อยสลายกลายเป็นอินทรีย์วัตถุในดิน การกักเก็บคาร์บอนแบบนี้จัดเป็นหนึ่งในแนวทางการจัดการคาร์บอนเพื่อลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศโดยเก็บสะสมไว้ในดิน จัดเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศและเป็นแนวทางการจัดการดินอย่างยั่งยืน อย่างไรก็ตาม การกักเก็บคาร์บอนในมวลชีวภาพมีความผันแปรสูง ตั้งแต่ระยะสั้น (ในระบบวนเกษตร) จนถึงหลายร้อยปี (ในระบบป่า) การสะสมอินทรีย์คาร์บอนในดินโดยกระบวนการทางธรรมชาตินั้นช้ามากและมีแนวโน้มที่จะสูญเสียได้ง่าย ดังนั้น การใช้ที่ดินที่ทำให้เกิดการดูดใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นจำนวนมากโดยพืช และทำให้เกิดการกักเก็บคาร์บอนเป็นระยะเวลานานจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศและบรรเทาภาวะโลกร้อน (Lehmann and Joseph, 2009)

ถ่านชีวภาพ

ถ่านชีวภาพได้รับความสนใจในการนำมาใช้เป็นเครื่องมือกักเก็บคาร์บอนลงสู่ดิน โดยเฉพาะดินในภาคเกษตรกรรม เนื่องจากประเทศไทยมีวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นจำนวนมาก ซึ่งสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (2554) รายงานว่า วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมีมากถึง 102 ล้านตันต่อปี และยังไม่ได้ใช้ประโยชน์หรือมีการจัดการที่ดีสูงถึง 64.74 ล้านตัน ดังนั้น การนำวัสดุเหลือใช้เหล่านี้มาเปลี่ยนสภาพให้เป็นถ่านชีวภาพน่าจะเป็นประโยชน์ต่อภาคการเกษตร และเป็นการกักเก็บคาร์บอนลงดิน รวมถึงช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดสภาวะโลกร้อน แต่อย่างไรก็ตาม คุณภาพของถ่านชีวภาพจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น เทคโนโลยีการผลิต การไฟโรไลซิส วัสดุที่ใช้ผลิตถ่านชีวภาพ และปริมาณถ่านชีวภาพที่ใส่ลงไปในดิน เป็นต้น

1. เทคโนโลยีการผลิตถ่านชีวภาพ

ในช่วงแรกของการผลิตถ่านชีวภาพ เกษตรกรมักใช้เตาเผาถ่านแบบดั้งเดิมเผาวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรซ้ำๆ ถือเป็นเตาชนิดแรกของโลกที่ยังคงมีใช้อยู่ถึงปัจจุบัน โดยจะมีขนาดรูปร่างแตกต่างกันไป อาทิ เตาหลุม ซึ่งเตาเผาประเภทนี้จะก่อสร้างง่าย มีราคาถูกและไม่ต้องดูแลรักษามาก เพราะใช้แค่การขุดดินให้เป็นหลุมแล้ววางไม้ลงในหลุม และใช้ดินกลบ แต่วิธีการนี้ทำให้ผลผลิตและคุณภาพค่อนข้างต่ำ เนื่องจากอากาศสามารถไหลผ่านวัสดุที่ใส่ลง (ดิน) ได้ และทำให้คาร์บอนมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ของวัตถุดิบถูกปลดปล่อยออกสู่บรรยากาศ (Brown, 2009) ต่อมามีการนำอิฐมาทำเป็นเตาเผาซึ่งสามารถควบคุมความร้อน และการถ่ายเทอากาศได้ดีกว่าการใช้เตาเผาแบบดั้งเดิมและได้ถ่านชีวภาพมากกว่า ถัดมาช่วงปี 1930 มีการใช้วัสดุจากเหล็กทำเป็นเตาเผาสามารถควบคุมความร้อน และการถ่ายเทอากาศได้ดีขึ้น และได้ถ่านชีวภาพมากกว่าเตาสองแบบแรก รวมทั้งมีความสะดวกมากขึ้น เนื่องจากสามารถเคลื่อนย้ายเตาได้ แต่อย่างไรก็ตามวิธีการเผาถ่านชีวภาพทั้งหมดที่กล่าวมามีการปลดปล่อยก๊าซสังเคราะห์และน้ำมันชีวภาพมาก ทำให้เกิดการปนเปื้อนสภาพแวดล้อมได้ ในเวลาต่อมาได้มีการพัฒนาเตาเผาขั้นสูงที่สามารถนำก๊าซสังเคราะห์และน้ำมันชีวภาพที่ปล่อยออกมาไปใช้ประโยชน์สำหรับกิจกรรมอื่นๆ ได้ (Abdelhafez et al., 2017; Chintala et al., 2013) ซึ่งคาดว่าจะช่วยเพิ่มผลผลิต และคุณภาพของถ่านชีวภาพได้ดี นอกจากนี้กระบวนการเผาแบบต่อเนื่องยังสามารถรองรับการควบคุมมลพิษได้มากกว่าเมื่อเทียบกับกระบวนการอื่น หลังจากการเผาไหม้คาดว่าจะลดการปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ (carbon monoxide) และสารระเหยสู่บรรยากาศได้อย่างน้อยร้อยละ 80 (Brown, 2009)

2. การไฟโรไลซิส

ถ่านชีวภาพ คือวัสดุอินทรีย์ที่อุดมด้วยคาร์บอนผลิตมาจากวัสดุธรรมชาติ เช่น ใบไม้ กิ่งไม้ เปลือกผลไม้ มูลสัตว์ วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร หรือของเสียจากครัวเรือน เป็นต้น (Masulili et al., 2010) โดยผ่านกระบวนการเผาไหม้ที่มีการควบคุมอุณหภูมิและอากาศ โดยใช้อุณหภูมิตั้งแต่ 250-1,000 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจนหรือมีออกซิเจนน้อยมาก เรียกว่า

การแยกสลายด้วยความร้อนหรือการไพโรไลซิส (pyrolysis) (Rawat et al., 2019) การไพโรไลซิสสามารถจำแนกได้ 3 แบบหลักๆ ได้แก่ 1) การแยกสลายแบบช้า (slow pyrolysis) เป็นการให้ความร้อนอย่างช้าๆ โดยใช้อุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำกันมานานแล้วเรียกการเผาถ่าน หากมีการควบคุมอุณหภูมิให้ต่ำและใช้เวลานานก็จะได้ผลผลิตถ่านมากขึ้น 2) การแยกสลายแบบเร็ว (fast pyrolysis) เป็นการให้ความร้อนอย่างรวดเร็ว ผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถใช้ประโยชน์ได้ทั้งหมด การให้ความร้อนอย่างรวดเร็วทำให้เกิดถ่านน้อยหรือบางสภาวะอาจลดการเกิดถ่านได้ และ 3) กระบวนการแปรสภาพเป็นก๊าซ (gasification) ผลผลิตของกระบวนการที่เกิดขึ้นประกอบด้วยน้ำมันชีวภาพ (bio-oil) หรือน้ำส้มควันไม้ ก๊าซสังเคราะห์ (syngas) และถ่านชีวภาพ (Verheijen et al., 2010) การผลิตถ่านชีวภาพด้วยวิธีการแยกสลายอย่างช้า น่าจะเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการผลิตถ่านชีวภาพ เนื่องจากได้ผลผลิตประมาณ 35 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้งมวลชีวภาพ ซึ่งต่างจากวิธีการแยกสลายแบบเร็วที่มีประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับการผลิตน้ำมันชีวภาพซึ่งได้ผลผลิตประมาณ 75 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่การแปรสภาพเป็นก๊าซจะผลิตก๊าซสังเคราะห์ได้สูงที่สุดได้ผลผลิตก๊าซประมาณ 85 เปอร์เซ็นต์ (Table 1) (Abdelhafez et al., 2017; Chintala et al., 2013; Tomzyk et al., 2020)

Table 1 Yields from the pyrolysis process by the fast pyrolysis, slow pyrolysis and gasification

Pyrolysis	Temperature (°C)	Time	Yields		
			bio-oil	syngas	biochar
Fast pyrolysis	400-600	seconds	75	13	12
Slow pyrolysis	250-500	seconds -hours	30	35	35
Gasification	700-1,500	seconds -minutes	8	85	10

Source: Abdelhafez et al. (2017); Chintala et al. (2013); Tomzyk et al. (2020)

การเปลี่ยนแปลงของมวลชีวภาพในระหว่างการไพโรไลซิสสามารถแบ่งได้เป็น 3 ช่วง ได้แก่ 1) ช่วงก่อนไพโรไลซิส (pre-pyrolysis) เป็นช่วงที่เริ่มเผาซึ่งมีอุณหภูมิปกติจนถึง 200 องศาเซลเซียส ช่วงนี้เกิดการระเหยของความชื้นและสารประกอบบางชนิดในมวลชีวภาพหรือวัตถุดิบ เนื่องจากมีการทำลายพันธะทางเคมีของกลุ่มไฮโดรเปอร์ออกไซด์ กลุ่มคาร์บอกซิล และกลุ่มคาร์บอนิล (Cardenas-Aguir et al., 2017) 2) ช่วงไพโรไลซิสหลัก (main-pyrolysis) เป็นช่วงที่อุณหภูมิการเผาอยู่ระหว่าง 200-500 องศาเซลเซียส ในช่วงนี้สารประกอบเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสมีการสลายตัวอย่างรวดเร็ว โดยปกติมักจะเริ่มเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 200-260 องศาเซลเซียส (Ding et al., 2014) และ 3) ช่วงสร้างวัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก (formation of carbonaceous products) อุณหภูมิอาจจะน้อยหรือมากกว่า 500 องศาเซลเซียส สารประกอบที่มีพันธะทางเคมีแข็งแรง เช่น ลิกนินจะเริ่มสลายตัวในช่วงนี้ (Lee et al., 2017) เป็นต้น อุณหภูมิของกระบวนการไพโรไลซิสมีความสัมพันธ์อย่างมากกับโครงสร้างและสมบัติทางเคมีกายภาพและเคมีของถ่านชีวภาพ เช่น เมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มสูงขึ้น พื้นที่ผิว สัดส่วนของคาร์บอน ความเป็นกรด-ด่าง และสารระเหยบางชนิดเพิ่มขึ้นอย่างมาก ในขณะที่ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนและหมู่ฟังก์ชันบางชนิดบนพื้นผิวลดลง (Asadullah et al., 2007)

3. ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพถ่านชีวภาพ

1) ประเภทของวัสดุที่นำมาผลิตถ่านชีวภาพ เป็นส่วนประกอบหลักที่ทำให้ผลผลิตและสมบัติต่างๆ ของถ่านชีวภาพแตกต่างกัน โดยมีผลต่อโครงสร้างทางกายภาพและเคมีของถ่านชีวภาพเป็นอย่างมาก (Laine et al., 1991) โดยทั่วไปวัตถุดิบใช้ในการไพโรไลซิสเป็นมวลชีวภาพหรือสารประกอบอินทรีย์ซึ่งได้มาจากเศษซากพืช วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร หรือของเสียประเภทต่างๆ เช่น มูลสัตว์ เศษกระดาษ กากตะกอน และของเสียจากอุตสาหกรรม เป็นต้น วัตถุดิบเหล่านี้จะมีลิกนินเซลลูโลส (เป็นสารประกอบเชิงซ้อนของลิกนิน เฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลส) เป็นส่วนประกอบสำคัญ เซลลูโลสย่อยสลายตัวทางความร้อนเร็ว ในขณะที่ลิกนินมีเสถียรภาพสูงทำให้การสลายตัวทางความร้อนเกิดขึ้นได้ช้ากว่า (Yang et al., 2007) วัตถุดิบที่มีลิกนินในปริมาณสูงมีแนวโน้มจะผลิตถ่านชีวภาพได้มากกว่า ในขณะที่วัตถุดิบที่มีเซลลูโลสมากจะผลิตน้ำมันดิบได้มาก (Collard and Blin, 2014) รวมถึงความชื้นของมวลชีวภาพที่สูงขึ้น

มักจะทำให้ปริมาณผลผลิตของถ่านชีวภาพลดลง เช่น การศึกษาความชื้นของตัวอย่างเปลือกไม้พบว่า เมื่อความชื้นของเปลือกไม้ลดลง พื้นผิวถ่านจะกลายเป็นหลายสีและมีลักษณะคล้ายแกรไฟต์มากขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากระยะเวลาในการไพโรไลซิสยาวนานมากขึ้น หลังจากที่มีน้ำได้ระเหยไปแล้ว (Darmstadt et al., 2000) El-Gamal et al. (2017) รายงานว่าปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และความชื้นของขานอ้อยสูงกว่าแกลบ แต่มวลชีวภาพของแกลบมีลิกนินและเถ้าสูงกว่า ทำให้คุณภาพของถ่านชีวภาพจากแกลบแตกต่างจากถ่านชีวภาพจากขานอ้อย สอดคล้องกับ Windeatt et al. (2014) รายงานว่าคาร์บอนของถ่านชีวภาพจากขานอ้อยและแกลบมีค่าเท่ากับ 88.6 และ 54.5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตาม ถึงแม้วัสดุที่นำมาผลิตถ่านชีวภาพเป็นวัตถุดิบเดียวกัน คุณภาพของถ่านชีวภาพที่ได้ก็อาจมีความแตกต่างกันสูงได้

2) อุณหภูมิการไพโรไลซิส กระบวนการไพโรไลซิสของลิกโนเซลลูโลสมักจะอยู่ที่อุณหภูมิในช่วง 200–700 องศาเซลเซียส (Zhou et al., 2014) จากการศึกษาว่าการลดลงของผลผลิตถ่านชีวภาพในวัตถุดิบหลายชนิดเกิดจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการไพโรไลซิส (Leng and Huang, 2018) ในระหว่างการไพโรไลซิส โครงสร้างของมวลชีวภาพจะมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งทำให้โครงสร้างอะโรมาติกเพิ่มขึ้น (Enders et al., 2012) การไพโรไลซิสจะเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาการสลายตัวด้วยความร้อนของมวลชีวภาพ เช่น การควบแน่น พอลิเมอไรเซชัน การสูญเสีย น้ำ ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและดีออกซิเนชัน เป็นต้น ส่วนประกอบเซลลูโลสของวัตถุดิบจะเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิ 200–400 องศาเซลเซียส ในขณะที่ลิกนินเริ่มสลายตัวที่ 300–700 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีเสถียรภาพสูงกว่าเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส (Cao et al., 2014)

3) อัตราการให้ความร้อน การให้ความร้อนสูงในการไพโรไลซิสจะทำให้กระบวนการคาร์บอนไนเซชันของวัตถุดิบเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เกิดการแตกของถ่านชีวภาพ การสร้างรูพรุนขนาดเล็กและพื้นที่ผิวของถ่านชีวภาพสูงขึ้น (Mukherjee and Lal, 2013)

4) เวลาในการเผาไหม้ การไพโรไลซิสมักแบ่งตามช่วงของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในระหว่างการเผา เวลาในการเผาไหม้มวลชีวภาพที่เพิ่มขึ้นทำให้ผลผลิตถ่านลดลงมากขึ้น (Kumar et al., 2013)

4. สมบัติทางกายภาพและเคมีของถ่านชีวภาพ

สมบัติทางกายภาพที่สำคัญของถ่านชีวภาพ ได้แก่ รูพรุนและพื้นที่ผิวจำเพาะ (Table 2) เมื่ออุณหภูมิการไพโรไลซิสเพิ่มสูงกว่า 200 องศาเซลเซียส สารประกอบอินทรีย์บางส่วนจะเริ่มสลายตัวและสูญเสียความชื้น เฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสจะเริ่มถูกย่อยสลาย ในขณะที่การย่อยสลายลิกนินอาจจะเริ่มที่ 280-500 องศาเซลเซียส ซึ่งการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมินี้ทำให้การเรียงตัวของคาร์บอนของถ่านชีวภาพเป็นระเบียบมากขึ้น (Figure 1) (Downie et al., 2009) ในช่วงนี้ สารประกอบที่อยู่ในรูพรุนถูกขับออกและพื้นที่ผิวของถ่านชีวภาพเกิดการแตกตัวจากความร้อนที่เพิ่มขึ้น เป็นผลทำให้รูพรุนและพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านชีวภาพเพิ่มมากขึ้น (Rafiq et al., 2016) ประเภทของวัตถุดิบที่ใช้ผลิตถ่านชีวภาพนับเป็นปัจจัยที่สำคัญปัจจัยหนึ่งในการกำหนดพื้นที่ผิวและรูพรุนของถ่านชีวภาพ Kajina and Rousset (2018) รายงานว่าถ่านชีวภาพที่ผลิตจากใบอ้อยมีรูพรุน 0.1 ตารางเมตรต่อกรัม และพื้นที่ผิวจำเพาะ 253.2 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งสูงกว่าถ่านชีวภาพจากกะลามะพร้าวที่มีรูพรุน 0.1 ตารางเมตรต่อกรัม และพื้นที่ผิวจำเพาะ 25.8 ตารางเมตรต่อกรัม ทั้งนี้เป็นผลมาจากความแตกต่างของการไพโรไลซิส ปริมาณลิกนินและเซลลูโลสของวัตถุดิบ โดยทั่วไปสมบัติทางกายภาพของถ่านชีวภาพนี้เกี่ยวข้องกับทั้งทางตรงและทางอ้อมกับการที่ถ่านชีวภาพมีผลต่อดิน เมื่อใช้ถ่านชีวภาพกับดินอาจกระทบต่อโครงสร้างของดินเป็นอย่างมาก เช่น กระทบต่อความพรุน และสมบัติดินต่อการไหลพรุน การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นรวมของดิน การเปลี่ยนแปลงโดยรวมของเม็ดดิน การกระจายขนาดของรูพรุนในดิน เป็นต้น (Brady and Weil, 2008)

Table 2 Surface area and pore volume of biochar

Pore size	Surface area (m ² g ⁻¹)	Volume (cm ³ g ⁻¹)
Small pores	750-1,360	0.2-0.5
Big pores	51-138	0.6-1.0

Source: Downie et al. (2009)

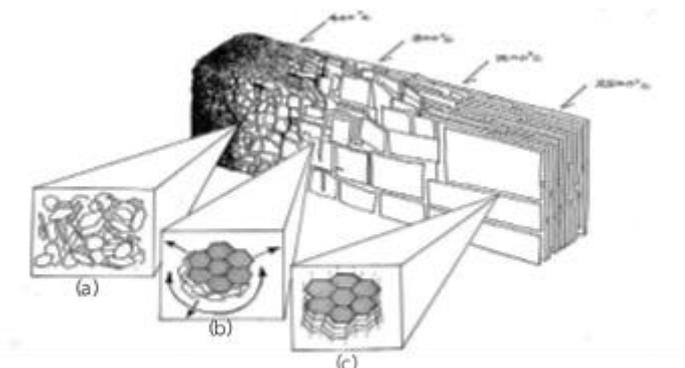


Figure 1 Pyrolysis temperature effect on biochar: a amorphous carbon; b turbostratic carbon; c graphite carbon

(Source: Downie et al. (2009))

ถ่านชีวภาพที่ได้มาจากมวลชีวภาพชนิดต่างๆ มีองค์ประกอบและสมบัติทางเคมีที่แตกต่างกัน ซึ่งได้รับอิทธิพลมาจากกระบวนการไพโรไลซิสและองค์ประกอบทางชีวเคมีของมวลชีวภาพ (Brennan et al., 2001) มวลชีวภาพตั้งต้นส่วนใหญ่ประกอบด้วยคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) และออกซิเจน (O) ในระหว่างการไพโรไลซิสของมวลชีวภาพ ไฮโดรเจนและออกซิเจนจะสูญเสียไปในรูปของการระเหยของน้ำ ซึ่งการสูญเสียนี้เกิดขึ้นในสัดส่วนที่มากกว่าการสูญเสียคาร์บอน สัดส่วนของคาร์บอนในส่วนของแข็งจะเพิ่มสูงขึ้นจากประมาณ 40-50 เป็น 70-80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ ถ่านชีวภาพยังคงประกอบไปด้วยไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) โพแทสเซียม (K) แคลเซียม (Ca) เหล็ก (Fe) โซเดียม (Na) และแมกนีเซียม (Mg) ในสัดส่วนที่ต่างกัน (Novak et al., 2009; Angin, 2013; Al-Wabel et al., 2013) Lehmann and Joseph (2009) ซึ่งให้เห็นว่าธาตุอาหารในถ่านชีวภาพแต่ละชนิดมีความแปรปรวนมาก เช่น ไนโตรเจนมีค่าอยู่ในช่วง 0.2 ถึง 2.7 เปอร์เซ็นต์ และโพแทสเซียมมีรายงานอยู่ในช่วง 30 ถึง 29,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมถ่าน ในขณะที่ฟอสฟอรัสมีรายงานอยู่ในช่วง 50 ถึง 2,100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมถ่าน เป็นต้น ซึ่งวัตถุดิบประเภทเดียวกันสามารถผลิตถ่านชีวภาพที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่ต่างกันมากได้

ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (cation exchange capacity; CEC) ได้รับผลกระทบมาจากหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านชีวภาพและนับว่าเป็นสมบัติทางเคมีที่สำคัญประการหนึ่ง เมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้น ค่า CEC ของถ่านชีวภาพลดลง (Mukherjee et al., 2011) โดยทั่วไปการไพโรไลซิสถ่านชีวภาพที่อุณหภูมิ 350-650 องศาเซลเซียส ทำให้พันธะทางเคมีของมวลชีวภาพถูกทำลายและจัดเรียงเป็นหมู่ฟังก์ชันใหม่ๆ บนผิวของถ่านชีวภาพ เช่น คาร์บอกซิล (carboxyl) แลคโตน (lactone) แลคตอล (lactol) และไพโรน (pyrone) เป็นต้น (Mia et al., 2017) ซึ่งการจัดเรียงตัวใหม่ของหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้ ทำให้เกิดความเปลี่ยนแปลงของค่า CEC จากการศึกษที่ผ่านมาชี้ให้เห็นว่าค่า CEC ของถ่านชีวภาพมีค่าอยู่ในช่วง 5-50 เซนติโมลต่อกิโลกรัม (Nelissen et al., 2015) และสามารถเพิ่มสูงถึง 204 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ความแปรปรวนของค่า CEC อาจเกิดจากปัจจัยหลายประการที่มีผลต่อหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวถ่านชีวภาพ เช่น อุณหภูมิ และวัตถุดิบที่ใช้ผลิตถ่านชีวภาพ เป็นต้น (Budai et al., 2014) นอกจากนี้ ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของถ่านชีวภาพมีความสัมพันธ์อย่างมากกับหมู่คาร์บอเนตและปริมาณอนินทรีย์อัลคาไลน์ ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ pH ของถ่านชีวภาพเป็นด่าง Yuan et al. (2011a) รายงานว่าเมื่ออุณหภูมิการไพโรไลซิสเพิ่มขึ้น ปริมาณของด่างทั้งหมดและหมู่คาร์บอเนตจะเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ซึ่งเป็นผลทำให้ค่า pH ของถ่านชีวภาพเพิ่มขึ้น และค่า pH ที่เพิ่มสูงขึ้นนั้นก็สัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของกลุ่มฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบซึ่งเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการไพโรไลซิสเช่นเดียวกัน

ถ่านชีวภาพมีอิทธิพลอย่างมากต่อสมบัติทางกายภาพ เคมี และชีวภาพของดิน และต่อปฏิกิริยากับประจุบวก ประจุลบ และสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ ในดิน (Pietikäinen et al., 2000) การประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพมีผลทั้งในเชิงบวกหรือเชิงลบต่อสมบัติของดิน ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้ถ่านชีวภาพปรับปรุงประสิทธิภาพของดินส่วนใหญ่ประกอบด้วย การลดความเป็นกรดของดิน (Dai et al., 2018) การเพิ่มความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนของดิน (Munera-Echeverri et al., 2018) ความสามารถในการอุ้มน้ำของดิน (Blanco-

Canqui, 2017) การเพิ่มธาตุอาหารในดิน (DeLuca et al., 2006) และเพิ่มศักยภาพในการเป็นแหล่งที่อยู่อาศัยของจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ในดิน และช่วยกระตุ้นการทำงานของจุลินทรีย์ในดินที่มีความสำคัญทางการเกษตรหลายชนิด (Karhu et al., 2011)

ถ่านชีวภาพและการกักเก็บคาร์บอนในดิน

ถ่านชีวภาพมีสมบัติหลักสองประการที่ทำให้เป็นตัวเลือกที่มีศักยภาพในการกักเก็บคาร์บอนระยะยาวในดิน ประการแรก คือ เสถียรภาพของถ่านชีวภาพ รวมถึงความทนทานต่อการย่อยสลายในสิ่งแวดล้อม เช่น ความทนทานต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ เป็นต้น (Liang et al., 2008) ซึ่งเกิดจากการที่ถ่านชีวภาพมีโครงสร้างอะโรมาติกเพิ่มขึ้นทำให้มีความทนทานมากยิ่งขึ้น และประการที่สอง คือความเข้มข้นของคาร์บอนมีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับความเข้มข้นของมวลชีวภาพ (Nguyen et al., 2010) ซึ่งความเข้มข้นนี้จะแตกต่างกันตามประเภทของวัตถุดิบและการไพโรไลซิส ในระหว่างการไพโรไลซิสของถ่านชีวภาพ มวลชีวภาพของพืชจะสลายตัวจากความร้อน ซึ่งส่วนที่เป็นของแข็งจะมีความเข้มข้นของคาร์บอนมากขึ้น ธาตุไฮโดรเจนและออกซิเจนจะสูญเสียไปในปริมาณที่มากกว่าคาร์บอน ทำให้อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนและอัตราส่วนออกซิเจนต่อคาร์บอนมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากมวลชีวภาพผ่านการเปลี่ยนรูปไปเป็นถ่านชีวภาพ (Nsamba et al., 2015) อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนและออกซิเจนต่อคาร์บอนเป็นตัวบ่งชี้ระดับการเกิดคาร์บอนในเซชัน และความเสถียรของถ่านชีวภาพ (Lehmann and Joseph, 2009) รวมถึงการแบ่งชั้นภายในของถ่านชีวภาพมีความเป็นระเบียบมากยิ่งขึ้น ทำให้ความเข้มข้นของสารประกอบอะโรมาติกที่หลอมรวมเพิ่มขึ้น ถ่านชีวภาพที่ผลิตได้จึงมีคาร์บอนที่มีความทนทานต่อการย่อยสลายในปริมาณสูง

โดยทั่วไป ถ่านชีวภาพไม่ได้จัดว่าเป็นการกักเก็บคาร์บอนจากชั้นบรรยากาศโดยตรง แต่ถ่านชีวภาพนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนที่กักเก็บไว้ในมวลชีวภาพให้อยู่ในรูปแบบที่มีความเสถียรมากยิ่งขึ้น ซึ่งมีส่วนช่วยในการเพิ่มการกักเก็บอินทรีย์คาร์บอนในดิน กลไกโดยรวมของการกักเก็บคาร์บอนโดยถ่านชีวภาพแสดงใน **Figure 2** โดย Lehmann et al. (2006) รายงานว่าการเปลี่ยนมวลชีวภาพให้เป็นถ่านชีวภาพทำให้เกิดการกักเก็บคาร์บอนประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณคาร์บอนทั้งหมด และเมื่อใส่ถ่านชีวภาพลงไปในดินจึงมีแนวโน้มที่คาร์บอนจะคงอยู่ในดินเป็นระยะเวลาานาน ซึ่งสอดคล้องกับ Liang et al. (2008) ที่รายงานว่าถ่านชีวภาพประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์จะเป็นประโยชน์ทันทีหลังการใส่ลงดิน และที่เหลืออีก 97 เปอร์เซ็นต์จะกักเก็บในดินในระยะยาว Wang et al. (2016) รายงานว่าค่ากลางของการย่อยสลายถ่านชีวภาพในดินในช่วง 2 ปีแรกมีค่าประมาณ 0.0046 เปอร์เซ็นต์ต่อวัน และอัตราการย่อยสลายหลังจากนี้จะอยู่ในระดับที่ต่ำมาก แต่อย่างไรก็ตาม การกักเก็บคาร์บอนในมวลชีวภาพพืชและในดินด้วยกระบวนการทางธรรมชาติมักจะใช้เวลานาน เช่น การกักเก็บคาร์บอน 31.6 ตันคาร์บอนต่อเฮกแตร์ในมวลชีวภาพ และ 3.32 ตันคาร์บอนต่อเฮกแตร์ในดินที่มีการทำเกษตรระบบ Silvopasture (มีการปลูกพืชและเลี้ยงสัตว์ในพื้นที่เดียวกัน) ใช้เวลาประมาณ 30 ปี (Gupta et al., 2020) ในระบบวนเกษตร มีค่าอยู่ในช่วง 0.25–19.14 ตันคาร์บอนต่อเฮกแตร์ต่อปีในมวลชีวภาพ และ 0.003–3.98 ตันคาร์บอนต่อเฮกแตร์ต่อปีในดิน (Dhyani et al., 2016) ซึ่งโดยทั่วไประบบวนเกษตรจะกักเก็บคาร์บอนไว้ในมวลชีวภาพเป็นเวลา 5–60 ปี และหลังจากเก็บเกี่ยวต้นไม้แล้วคาร์บอนในมวลชีวภาพที่กักเก็บไว้จะค่อยๆ ปลดปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศ หรือหากมีการแปรรูปไม้หรือมวลชีวภาพเหล่านั้น ระยะเวลาในการกักเก็บคาร์บอนยังขึ้นอยู่กับการใช้งาน เช่น ไม้ซุง ไม้ฟืน กระจดาช และเยื่อกระจดาช เมื่อเปรียบเทียบกับระบบเหล่านี้ การใช้ถ่านชีวภาพสามารถทำให้อัตราการกักเก็บคาร์บอนในดินเพิ่มขึ้นได้ดีกว่า

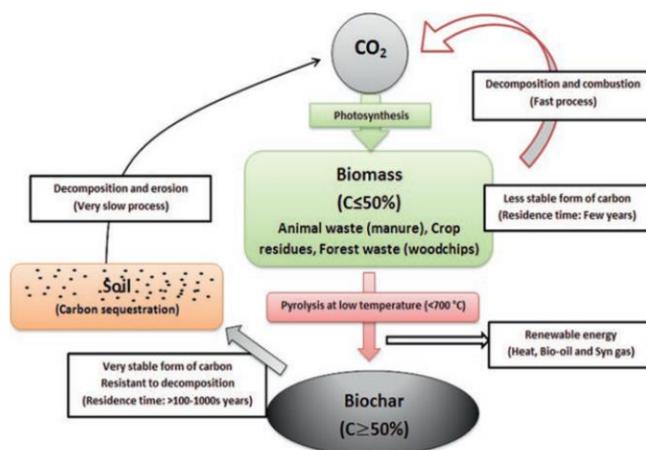


Figure 2 Carbon sequestration process through biochar (Source: Gupta et al. (2020))

ในพื้นที่เกษตรกรรม การศึกษาส่วนใหญ่สนับสนุนให้ใช้เศษเหลือจากการเกษตร ปศุสัตว์ และป่าไม้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านชีวภาพ เนื่องจากในแต่ละปีวัตถุดิบเหล่านี้จะมีอยู่เป็นจำนวนมาก การผลิตถ่านชีวภาพใช้เวลาค่อนข้างสั้น และถ่านชีวภาพที่ผลิตได้จะถูกนำไปใช้กับดินโดยตรง การศึกษาอัตราการใช้ถ่านชีวภาพในช่วง 10-100 ตันต่อเฮกตาร์ในพื้นที่เกษตรกรรม พบว่าถ่านชีวภาพสามารถเพิ่มผลผลิตพืชอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับแปลงควบคุมซึ่งไม่ได้ใช้ถ่านชีวภาพปรับปรุงดิน (Jeffery et al., 2011) เนื่องจากการใช้ถ่านชีวภาพปรับปรุงดินสามารถนำไปสู่การกักเก็บคาร์บอนประมาณ 10-100 ตันคาร์บอนต่อเฮกตาร์ในระยะเวลาภายใน 2 ปี แต่อย่างไรก็ตาม อัตราการกักเก็บคาร์บอนโดยใช้ถ่านชีวภาพจะแตกต่างกันไปตามความถี่ของการใช้ถ่านชีวภาพลงในดิน เมื่อเทียบกับระบบอื่น ถ่านชีวภาพจะสะสมอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาโดยมีการสูญเสียหรือสลายตัวในดินน้อยมาก เนื่องจากความทนทานต่อการสลายตัวในดิน (Major et al., 2010) การศึกษาในพื้นที่เกษตรพบว่าปริมาณคาร์บอนในดินเพิ่มขึ้นอย่างมากหลังจากมีการใช้ถ่านชีวภาพปรับปรุงดิน (Table 3) อาทิ Zhang et al. (2018) รายงานว่าหลังจากการใช้ถ่านชีวภาพฟางข้าวสาเลีปรับปรุงดินอัตราตั้งแต่ 0-40 ตันต่อเฮกตาร์ ในระยะเวลา 5 ปี พบว่าอินทรีย์คาร์บอนในดินแปลงที่ใช้ถ่านชีวภาพอัตรา 40 ตันต่อเฮกตาร์ มีปริมาณเพิ่มขึ้น 76.29 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับแปลงที่ไม่มีการใช้ถ่านชีวภาพ เป็นต้น

Table 3 Effect of biochar application rates on carbon sequestration in agricultural areas

Sources	Location	Biochar application rate	Soil carbon (g kg ⁻¹)
บรรเจิดลักษณ์ และคณะ (2562)	Thailand	1. Control	9.60
		2. Biochar rate of 3.13 t ha ⁻¹	11.2
		3. Biochar rate of 6.25 t ha ⁻¹	12.4
		4. Biochar rate of 12.50 t ha ⁻¹	14.0
		5. Biochar rate of 18.75 t ha ⁻¹	18.7
F-test			*
Cornelissen et al. (2013)	Kaoma, Zambia	1. Control	3.0
		2. Wood biochar 5 g kg ⁻¹	31.0
		3. Corn cob biochar 5 g kg ⁻¹	34.0
	UNZA, Zambia	1. Control	8.0
		2. Wood biochar 5 g kg ⁻¹	35.0
		3. Corn cob biochar 5 g kg ⁻¹	41.0
	Mkushi, Zambia	1. Control	4.0
		2. Wood biochar 5 g kg ⁻¹	32.0
		3. Corn cob biochar 5 g kg ⁻¹	33.0
	Lusaka, Zambia	1. Control	9.0
		2. Wood biochar 5 g kg ⁻¹	38.0
		3. Corn cob biochar 5 g kg ⁻¹	41.0
	Shimabala, Zambia	1. Control	16.0
		2. Wood biochar 5 g kg ⁻¹	44.0
		3. Corn cob biochar 5 g kg ⁻¹	51.0
F-test			*
Zhang et al. (2018)	China	1. Control	7.55
		2. Biochar rate of 2.5 t ha ⁻¹	7.44
		3. Biochar rate of 5 t ha ⁻¹	8.47
		4. Biochar rate of 10 t ha ⁻¹	8.71
		5. Biochar rate of 20 t ha ⁻¹	10.48
		6. Biochar rate of 30 t ha ⁻¹	11.36
		7. Biochar rate of 40 t ha ⁻¹	13.31
F-test			*

อย่างไรก็ตาม อัตราการกักเก็บคาร์บอนโดยใช้ถ่านชีวภาพจะแตกต่างกันไป ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อบทบาทของถ่านชีวภาพในการกักเก็บคาร์บอนประกอบด้วย 1) ปริมาณถ่านชีวภาพและปริมาณคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบของถ่านชีวภาพ ทั้งสองปัจจัยนี้มีความผันแปรสูง และขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบและการไพโรไลซิส 2) อัตราและความถี่ของการใช้ถ่านชีวภาพลงในดิน เมื่อเทียบกับระบบอื่น ถ่านชีวภาพจะสะสมอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา โดยมีการสูญเสียหรือสลายตัวในดินน้อยมาก เนื่องจากการทนทานต่อการสลายตัวในดิน (Steiner et al., 2007; Major et al., 2010) 3) วิธีการใช้และการจัดการดิน ถ่านชีวภาพสูญเสียออกไปจากดินได้สามทางได้แก่ การชะล้างออกจากผิวดิน การสลายตัวเนื่องจากสภาพแวดล้อม และการย่อยสลายทางชีวภาพ ซึ่งปัจจัยทางชีวภาพและสิ่งแวดล้อมมีผล

ต่อการสูญเสียถ่านชีวภาพไม่มากนักเมื่อเทียบกับการชะล้าง (Gupta et al., 2020) 4) ผลกระทบทางลบของการใช้ถ่านชีวภาพ นอกจากประโยชน์ทางการเกษตรแล้ว ถ่านชีวภาพอาจมีสารปนเปื้อนโดยธรรมชาติ ไม่ว่าจะเป็นจากวัตถุดิบ (เช่น โลหะหนัก) หรือเกิดขึ้น ในระหว่างการไพโรไลซิสที่ไม่เหมาะสม เช่น โพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน เป็นต้น (Hilber et al., 2017) อย่างไรก็ตาม ความเชื่อมโยงระหว่างสารปนเปื้อนโดยธรรมชาติของถ่านชีวภาพ และความเป็นพิษต่อดินยังคงไม่ชัดเจน และมีข้อมูลขัดแย้งกัน และ 5) การยอมรับของเกษตรกรเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลมากที่สุดอย่างหนึ่งสำหรับการกักเก็บคาร์บอนในดิน เนื่องจากเป็นผู้ใช้หลักในประเทศไทย บรรเจิดลักษณ์ และคณะ (2562) ศึกษาการยอมรับของเกษตรกรต่อการใช้ถ่านชีวภาพพบว่า เกษตรกรส่วนมากมีความสนใจใช้ ถ่านชีวภาพ แต่มีเกษตรกรบางส่วนยังไม่มั่นใจประโยชน์และวิธีการใช้ ซึ่งจะต้องมีการสนับสนุนส่งเสริม และเผยแพร่ความรู้ และ เทคโนโลยีถ่านชีวภาพรวมทั้งเงินทุน อุปกรณ์ หรือสิ่งอำนวยความสะดวกในการสร้างเตาเผาผลิตถ่านชีวภาพให้แก่เกษตรกร เช่นเดียวกัน ศิริลักษณ์ และ อรสา (2556) ได้ร่วมกับเกษตรกรใช้ถ่านชีวภาพเพื่อปลูกคะน้า และประเมินระดับความพึงพอใจของ เกษตรกรและเจ้าหน้าที่หน่วยงานเทศบาลต่อการเข้าร่วมกิจกรรมพบว่า อยู่ในระดับพึงพอใจมาก เมื่อทำการติดตามผู้เข้าร่วมกิจกรรม หลังจากเสร็จสิ้นกิจกรรมแล้ว 1 เดือน พบว่าผู้ได้เข้าร่วมกิจกรรมร้อยละ 57 มีการยอมรับนำไปใช้จริง นอกจากนี้ ผู้วิจัยยังพบว่า ความรู้เดิมของผู้เข้าร่วมกิจกรรมในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงดินไม่มีผลต่อระดับการยอมรับการใช้ถ่านชีวภาพปรับปรุงดิน สำหรับ ผู้ที่ยังไม่นำไปปฏิบัติจริงพบว่ามีสาเหตุมาจากการขาดอุปกรณ์ในการผลิตถ่านชีวภาพ

ถ่านชีวภาพและการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก

ถ่านชีวภาพมีบทบาทสำคัญในการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกและเพิ่มความสามารถในการกักเก็บก๊าซเรือนกระจกบาง ชนิดได้ โดยเฉพาะก๊าซไนตรัสออกไซด์ มีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งการลดการปลดปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์และมีเทนลงเพียง เล็กน้อยอาจก่อให้เกิดประโยชน์อย่างมากต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากศักยภาพการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนของก๊าซไนตรัสออกไซด์และมีเทน สูงกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 310 และ 25 เท่า ตามลำดับ (Forster et al., 2007) อย่างไรก็ตามความเข้าใจเกี่ยวกับ กลไกที่ถ่านชีวภาพส่งผลกระทบต่อวงจรของก๊าซมีเทนและไนตรัสออกไซด์มีอยู่จำกัด หากเข้าใจถึงกลไกเหล่านี้จะช่วยกำหนดบทบาท ของถ่านชีวภาพในการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกและลดผลกระทบด้านลบอื่นๆ ที่มีต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อใช้ถ่านชีวภาพปรับปรุงดิน

1. ถ่านชีวภาพและการลดการปลดปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์

การใช้ถ่านชีวภาพสามารถลดการปลดปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ออกสู่ชั้นบรรยากาศได้ (Table 4) ทั้งนี้ บทบาทของถ่านชีวภาพในการบรรเทาการปลดปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น สภาพดิน คุณลักษณะของถ่านชีวภาพ เป็นต้น (Fan et al., 2017) Cayuela et al. (2014) รายงานว่าถ่านชีวภาพจะลดการปลดปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ได้ดีในดินที่มี pH ใกล้เคียงกับ ค่า pH ที่เป็นกลางหรือเป็นกรด ซึ่งเกี่ยวข้องกับการทำงานของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน Yanai et al. (2007) รายงานว่าการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพที่ได้จากขยะอินทรีย์ทำให้ดินมีค่าการปลดปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์เท่ากับ 383 ไมโครกรัม ต่อตารางเมตร ในขณะที่อัตราการผลิตปล่อยก๊าซในดินที่ไม่ได้ใช้ถ่านชีวภาพมีค่าสูงกว่าเกือบ 7 เท่า โดยมีค่าเท่ากับ 2,620 ไมโครกรัม ต่อตารางเมตร ในทำนองเดียวกัน Rondon et al. (2006) เปรียบเทียบการปลดปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ในดินในเขตร้อน และพบว่า การใช้ถ่านชีวภาพอัตรา 8 และ 20 ตันต่อเฮกแตร์ปรับปรุงดินทำให้การปลดปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ลดลงโดยเฉลี่ย 15 มิลลิกรัมต่อ ตารางเมตรเมื่อเปรียบเทียบกับแปลงที่ไม่ได้ใช้ถ่านชีวภาพ และจากการศึกษาในห้องปฏิบัติการโดยให้ความชื้นในดินเพิ่มขึ้น 70 เปอร์เซ็นต์ของความสามารถในการอุ้มน้ำของดิน ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า การใช้ถ่านชีวภาพมีการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ลดลง ซึ่งถ่านชีวภาพแต่ละชนิดมีความสามารถในการลดการปล่อยก๊าซแตกต่างกัน (Rondon et al., 2006) นอกจากนี้ การศึกษาการลดการ ปล่อยปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากดินด้วยถ่านชีวภาพจากมูลสัตว์ปีกชี้ให้เห็นว่า ถ่านชีวภาพจากมูลสัตว์ปีกมีสารประกอบบางอย่างที่ ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนไนเตรตเป็นไนตรัสออกไซด์ และ/หรือเพิ่มการทำงานของเอนไซม์ดีไนตริฟิอิง (denitrifying enzyme) ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนไนตรัสออกไซด์เป็นไนเตรต โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณที่ไม่มีออกซิเจนและมีสาร คาร์บอนอินทรีย์ในปริมาณมาก ในทางกลับกัน กิจกรรมดีไนตริฟิเคชัน (denitrification) จะเพิ่มขึ้นในดินที่ปรับปรุงด้วยถ่านชีวภาพขยะ อินทรีย์ ผลของถ่านชีวภาพจากขยะอินทรีย์ถูกทดสอบในดินด้วยการบ่มดินเป็นเวลา 72 ชั่วโมง โดย Vance et al. (1987) พบว่าชีวมวล

ของจุลินทรีย์ในถ่านชีวภาพลดลงประมาณร้อยละ 40 ในขณะที่ถ่านชีวภาพของขยะมูลสัตว์ปีกไม่ทำให้ชีวมวลของจุลินทรีย์ในดินลดลงแต่อย่างใดก็ตาม ถึงแม้การศึกษาในครั้งนี้ชี้ว่าถ่านชีวภาพไม่มีผลต่อการเติบโตของจุลินทรีย์ แต่ข้อมูลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการย่อยสลายไนโตรเจนมีปริมาณมากขึ้น

Table 4 Some results of reduction of nitrous oxide emission after biochar application to the soil

Sources	Experiment conditions	Biochar application	Mitigation of N2O emission
Cayuela et al. (2014)	Meta data analysis of 30 publication	Meta data analysis	54%
Fan et al. (2017)	Greenhouse experiment with four types of soil	Wheat straw biochar Swine manure biochar	36.4–59.1% 37.0–49.5%
Borchard et al. (2019)	Meta data analysis of 88 publication	Meta data analysis	38%
Change et al. (2016)	Field experiment	Corn stover biochar	21.7%
Yanai et al. (2007)	Lab experiment	Organic waste biochar	85%
Zhang et al. (2010)	Field experiment	Wheat straw biochar	40-51%

ถ่านชีวภาพมีสมบัติหลายประการที่เป็นประโยชน์ในการลดการปลดปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากดินในพื้นที่เกษตร เช่น ความพรุนดิน ค่า pH หมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรดและด่าง และพื้นที่ผิวจำเพาะ ซึ่งส่วนใหญ่จะแตกต่างกันไปตามประเภทของวัตถุดิบที่ใช้สำหรับการผลิตถ่านชีวภาพและอุณหภูมิการไพโรไลซิส (Grutzmacher et al., 2018; Cayuela et al., 2014) เมื่อใส่ถ่านชีวภาพลงดิน ปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับถ่านชีวภาพทำให้ค่า pH ของดิน ระดับของออกซิเจนในดิน องค์ประกอบและกิจกรรมของจุลินทรีย์ ซึ่งส่งผลให้การปลดปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากดินลดลง (Edwards et al., 2018; Harter et al., 2014) การประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพเพื่อลดความเข้มข้นของสารไนเตรตและแอมโมเนียมสำหรับปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชัน เพิ่มค่า pH ของดิน และลดความเข้มข้นของเอนไซม์รีดักเตสของไนตรัสออกไซด์ลง ซึ่งนำไปสู่การเปลี่ยนไนตรัสออกไซด์เป็นก๊าซไนโตรเจน และท้ายที่สุด ลดการปลดปล่อยไนตรัสออกไซด์ (Harter et al., 2014) อย่างไรก็ตาม ถึงแม้การประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพสามารถลดการปลดปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ได้อย่างมาก ผลที่ได้ก็ไม่สามารถประยุกต์ใช้ได้กับถ่านชีวภาพทุกชนิด และลักษณะเฉพาะของถ่านชีวภาพจะส่งผลต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจน ซึ่งจำเป็นต้องมีการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมเพื่อทำความเข้าใจอย่างชัดเจนถึงผลของถ่านชีวภาพและส่วนประกอบที่เกี่ยวข้องที่อาจเกิดขึ้นได้ โดยเฉพาะผลกระทบต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการหมุนเวียนธาตุอาหารในดิน (Gundale and DeLuca, 2006; Yanai et al., 2007)

2. ถ่านชีวภาพและการลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทน

ดินมีบทบาทในการปลดปล่อยก๊าซมีเทนออกสู่บรรยากาศประมาณ 15–30 เปอร์เซ็นต์ และการปลดปล่อยก๊าซมีเทนประมาณ 12 เปอร์เซ็นต์มาจากพื้นที่เพาะปลูกข้าว (Xiao et al., 2018) การศึกษาการลดการปล่อยก๊าซมีเทนจากพื้นที่เกษตรส่วนใหญ่จึงดำเนินการในพื้นที่นาข้าว ซึ่งการลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากนาข้าวมีหลากหลายแนวทาง เช่น การปลูกข้าวโดยใช้เมล็ดพันธุ์โดยตรง (Gupta et al., 2016) การทำให้พื้นที่นาข้าวเปียกและแห้งสลับกัน (Gupta et al., 2015) และการใช้แหนแดงเป็นปุ๋ยชีวภาพ (Malyan et al., 2019) เป็นต้น นอกจากนี้ การใช้ถ่านชีวภาพปรับปรุงดินในนาข้าวก็นับเป็นแนวทางหนึ่งซึ่งแสดงให้เห็นที่มีศักยภาพในการลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทนในนาข้าว (Jeffery et al., 2016) ซึ่งการลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทนนี้จะช่วยลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกในบรรยากาศได้อีกด้วย Liu et al. (2011) ทดสอบอัตราการปลดปล่อยก๊าซมีเทนในนาข้าวด้วยการใส่ถ่านชีวภาพ 2 ชนิด คือ ถ่านชีวภาพจากไม้ไผ่และฟาง เมื่อเปรียบเทียบกับแปลงควบคุมที่ไม่มีการใช้ถ่านชีวภาพ พบว่าการปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากแปลงถ่านชีวภาพจากไม้ไผ่และฟางลดลง 51.1 และ 91.2 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในทำนองเดียวกัน Pratiwi and Shinogi (2016) รายงานว่าการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพจากแกลบอัดรา 2 และ 4 เปอร์เซ็นต์ พบว่าการปล่อยก๊าซมีเทนลดลง 45.2 และ 54.9 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเทียบ

กับแปลงควบคุมที่ไม่มีการใช้ถ่านชีวภาพ Nan et al. (2020) รายงานเช่นเดียวกันว่านาข้าวที่มีการใช้ถ่านชีวภาพอัตรา 2.8 ตันต่อเฮกแตร์ ทำให้การปล่อยก๊าซมีเทนลดลง 41 เปอร์เซ็นต์ จากการศึกษาเหล่านี้แสดงให้เห็นว่าการใช้ถ่านชีวภาพสามารถลดการปล่อยก๊าซมีเทนจากดินได้ (Table 5)

Table 5 Some results of reduction of methane emission

Sources	Experiment conditions	Biochar application	Mechanism	Mitigation of CH ₄ emission
Liu et al. (2011)	Paddy field experiment	Bamboo biochar Straw biochar	Decreased methanogens	51.1 - 91.2%
Pratiwi and Shinogi (2016)	Paddy field experiment	Rice husk biochar	- Decrease soil bulk density - Increase soil saturated hydraulic conductivity - Increased porosity	45.2 - 54.9%
Nan et al. (2020)	Paddy field experiment	Rice straw biochar	Increased methanotrophs	41%
Han et al. (2016)	Paddy field experiment	Rice straw biochar	Decreased methanogens and increased methanotrophs	39.5%
Feng et al. (2012)	Paddy field experiment with two types of soil	Corn stalk biochar	Decreased methanogens	64.5 - 80.6%
Xiao et al. (2018)	Paddy field experiment	Rice straw biochar	Increases in soil dissolved organic carbon, NH ₄ ⁺ -N,	25.6 – 29.7%

กลไกการลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากดินในนาข้าวที่ใช้ถ่านชีวภาพได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวางทั้งการทดลองในสภาพกระถางหรือภาคสนามในระยะสั้น ผลจากการศึกษาส่วนใหญ่ชี้ให้เห็นว่าการลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทนอาจเป็นผลมาจากการลดกิจกรรมของแบคทีเรียเมทาโนเจน (methanogen) ซึ่งเป็นกลุ่มสร้างก๊าซมีเทน และการเพิ่มกิจกรรมของแบคทีเรียเมทาโนโทรฟ (methanotrophs) ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่ทำปฏิกิริยากับมีเทน (เป็นแหล่งคาร์บอนหลักในการผลิตพลังงาน) (Han et al., 2016; Nan et al., 2021) และ การใช้ถ่านชีวภาพทำให้บริเวณรากพืชมีสภาพที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียเมทาโนโทรฟ โดย Feng et al. (2012) รายงานว่าถ่านชีวภาพช่วยเพิ่มความพรุนและปรับปรุงโครงสร้างของดิน ซึ่งช่วยให้แบคทีเรียเมทาโนโทรฟสามารถเจริญเติบโตและพัฒนาในบริเวณนั้นได้มากขึ้น ซึ่งแบคทีเรียเหล่านี้จะใช้ก๊าซมีเทนเป็นแหล่งพลังงาน จึงทำให้การปลดปล่อยก๊าซมีเทนออกจากดินลดลง นอกจากนี้ ปัจจัยอื่นๆ เช่น สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดิน ประเภทของวัสดุที่ผลิตถ่านชีวภาพ และกระบวนการเตรียมถ่านชีวภาพ (อุณหภูมิของการไพโรไลซิส) ส่งผลต่อกระบวนการปล่อยก๊าซมีเทนเช่นกัน (Feng et al., 2012) ถ่านชีวภาพอาจยับยั้งการปล่อยก๊าซมีเทนโดยการทำให้ pH ของดินเพิ่มขึ้น Yang et al. (2017) รายงานว่า pH ของดินที่เพิ่มขึ้นทำให้กิจกรรมของเมทาโนโทรฟเพิ่มขึ้นและการปลดปล่อยมีเทนลดลง Qin et al. (2016) ตั้งข้อสังเกตว่าการปล่อยก๊าซมีเทนมีความสัมพันธ์เชิงลบกับ pH ของดิน ซึ่งค่า pH ที่เพิ่มขึ้นอาจไปยับยั้งการทำงานของเมทาเนจิคและส่งผลให้ปล่อยก๊าซมีเทนลดลง (Butnan et al., 2016) การค้นพบนี้ได้รับการยืนยันโดยการศึกษาของ Xu et al. (2016) ที่พบความสัมพันธ์เชิงลบระหว่างค่า pH ของดินและศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน

ในบริบทของประเทศไทยที่วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมีมากกว่า 100 ล้านตันต่อปี (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2554) ในขณะที่พื้นที่นาข้าวประมาณ 65 ล้านไร่ทั่วประเทศมีฟางข้าวและตอซังข้าวที่ตกค้างอยู่ในนาข้าวรวมเป็น 61.87 ล้านตัน ซึ่งพื้นที่ที่มีปริมาณวัสดุเหลือทิ้งจากฟางข้าวและตอซังข้าวมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตอซังพืชชนิดอื่น ทั้งนี้ Junpen et al. (2018) รายงานว่า ฟางข้าวและตอซังประมาณ 32 เปอร์เซ็นต์ หรือประมาณ 19.8 ล้านตันจะถูกเผาในสภาพแปลงและมีการปลดปล่อยคาร์บอนในรูปก๊าซ

คาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 5.34 ล้านตัน ดังนั้น หากสามารถฟางข้าวและตอซังเหล่านี้นำมาผลิตเป็นถ่านชีวภาพ นอกจากจะสามารถใช้ถ่านชีวภาพจากฟางข้าวและตอซังเพื่อการปรับปรุงดินได้แล้ว ยังช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่ชั้นบรรยากาศผ่านการกักเก็บคาร์บอนในรูปที่มีความคงตัวสูง และไม่ย่อยสลายตามธรรมชาติโดยง่าย ซึ่งจัดเป็นแนวทางสำคัญที่ช่วยบรรเทาภาวะโลกร้อน และการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ แต่อย่างไรก็ตาม มีการศึกษาไม่มากนักที่แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของถ่านชีวภาพในการลดการปล่อยมีเทนในระยะเวลายาว และกลไกที่อธิบายถึงการลดลงของการลดการปลดปล่อยก๊าซยังคงไม่มีความชัดเจน การขาดการติดตามผลของการปลดปล่อยมีเทนอย่างต่อเนื่องในระยะยาวหลังจากการใช้ถ่านชีวภาพในนาข้าว ทำให้เป็นเรื่องยากที่จะประเมินผลการลดก๊าซมีเทนของการใช้ถ่านชีวภาพในหลักการทางวิทยาศาสตร์ นอกจากนี้ ฟางข้าวและตอซังในพื้นที่นาข้าวบางส่วนได้ถูกไถกลบลงสู่ดินภายหลังจากการเก็บเกี่ยวผลผลิตเพื่อให้เกิดกระบวนการย่อยสลายในดินซึ่งจะกลายเป็นแหล่งของอินทรีย์วัตถุและธาตุอาหารพืชต่อไป แต่อย่างไรก็ตาม การไถกลบมีรายงานทั้งช่วยลดและเพิ่มการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Zhang et al., 2021) ดังนั้น ประสิทธิภาพและกลไกของถ่านชีวภาพในการลดการปล่อยก๊าซมีเทนในระยะยาวในนาข้าว เปรียบเทียบกับการไถกลบตอซังยังคงต้องมีการศึกษาต่อไป

สรุปและข้อเสนอแนะ

การผลิตถ่านชีวภาพเป็นวิธีการที่ยั่งยืนในการกักเก็บคาร์บอนในดิน และลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่ชั้นบรรยากาศ เนื่องจากถ่านชีวภาพมีความต้านทานต่อการย่อยสลายในดิน และการจัดเรียงตัวของชั้นคาร์บอนของถ่านชีวภาพมีความเป็นระเบียบ ทำให้ถ่านชีวภาพที่ผลิตได้มีคาร์บอนที่ทนทาน รวมถึงความเข้มข้นของคาร์บอนในถ่านชีวภาพค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับมวลชีวภาพของพืช ทำให้ถ่านชีวภาพเป็นตัวเลือกที่มีศักยภาพสำหรับการกักเก็บคาร์บอนในระยะยาวในดิน อย่างไรก็ตาม ถ่านชีวภาพไม่ได้ถือว่าเป็นการกักเก็บคาร์บอนจากชั้นบรรยากาศโดยตรง แต่ถ่านชีวภาพนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนที่กักเก็บไว้ในมวลชีวภาพให้อยู่ในรูปแบบที่เสถียรมากยิ่งขึ้น ซึ่งมีส่วนช่วยในการเพิ่มการกักเก็บอินทรีย์คาร์บอนในดิน รวมทั้งทำให้เกิดการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศได้ นอกเหนือจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ถ่านชีวภาพสามารถลดการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ และมีเทนซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญ ผลผลิต ลักษณะ และอัตราการใช้ถ่านชีวภาพแตกต่างกันอย่างมาก ขึ้นอยู่กับคุณภาพของวัตถุดิบและอุณหภูมิไพโรไลซิส อย่างไรก็ตาม การศึกษาส่วนใหญ่ยังจำกัดอยู่ในห้องปฏิบัติการหรือการทดลองภาคสนามในระดับสถาบัน การใช้ถ่านชีวภาพในดินเกษตรโดยเกษตรกรยังมีอยู่น้อย รวมถึงการใช้ถ่านชีวภาพในการเกษตรเชิงพาณิชย์ยังคงมีน้อย (Maroušek et al., 2019) และยังไม่มีความเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวาง (Major et al., 2010) นอกจากนี้ ถ่านชีวภาพยังไม่ได้รับการสนับสนุนอย่างเป็นทางการจากโครงการหรือองค์กรที่เกี่ยวข้อง ด้วยเหตุนี้ จึงมีความจำเป็นในการพัฒนาแนวทางการผลิตและการประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพในภาคสนามเพื่อใช้ประโยชน์ถ่านชีวภาพในการเพิ่มคุณภาพของดิน และบรรเทาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และหน่วยงานที่เกี่ยวข้องทั้งระดับนานาชาติและระดับประเทศควรริเริ่มพัฒนาข้อกำหนดหรือข้อตกลง และแนวปฏิบัติของการประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพในดินเพื่อให้เกิดการยอมรับมากยิ่งขึ้น

คำขอบคุณ

ขอขอบคุณ ดร. บรรเจิดลักษณ์ จินตฤทธิ ผู้เชี่ยวชาญด้านการปรับปรุงดินเปรี้ยว และ ดร. นवलจันทร์ ชะบา ผู้เชี่ยวชาญด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางดิน กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ สำหรับคำแนะนำที่ทำให้บทความทางวิชาการฉบับนี้ควรค่าแก่การเผยแพร่ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อกักวิจัย นักวิชาการ และผู้ที่เกี่ยวข้องในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาที่ดิน. 2558. สถานภาพทรัพยากรดินและที่ดินของประเทศไทย. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

- บรรเจิดลักษณ์ จินตฤทธิ์, สุนันทา เศรษฐบุณยสร้าง, พันธุ์ศักดิ์ โกเมศ, กำชัย กาญจนธนเศรษฐ และนันทภพ ชลเขต. 2562. ผลของการใช้ถ่านชีวภาพที่มีต่อคุณภาพดินและลดก๊าซเรือนกระจกเพื่อปลูกผักอินทรีย์. กรมพัฒนาที่ดิน, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.
- ฤทัยรัตน์ โพธิ. 2552. ก๊าซเรือนกระจกกับการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ: ก๊าซมีเทนในนาข้าว. วารสารวิชาการ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์. 1(1): 83-92.
- ศิริลักษณ์ ศิริสิงห์ และอรสา สุขสว่าง. 2556. การประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพในการปรับปรุงดินเพื่อการเกษตร. วารสารสังคมศาสตร์และมนุษยศาสตร์. 39(2): 212-225.
- สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2553. รายงานฉบับสมบูรณ์การจัดทำบัญชีก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทย. กรุงเทพฯ.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2554. ข้อมูลพื้นฐานเศรษฐกิจการเกษตร ปี 2554. แหล่งข้อมูล: http://www.oae.go.th/download/download_journal/fundamtion-2554.pdf. ค้นเมื่อ 22 กันยายน 2555.
- อัญชัน พิมพ์สวรรค์, ยุวดี อินสำราญ, และญาณวุฒิ อุทธิรักษ์. 2562. โครงสร้างไม้ต้น ความหลากหลายชนิด และการกักเก็บคาร์บอนในมวลชีวภาพของป่าชุมชนบ้านหินลาด และบ้านหินลาดเก่าน้อย ตำบลแว้งนาง อำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม. วารสารเกษตรพระจอมเกล้า. 37(1): 88-96.
- Abdelhafez, A.A., M.H. Abbas, and J. Li. 2017. Biochar: the black diamond for soil sustainability contamination control and agricultural production. *Engineering Applications of Biochar*. 2: 7-27.
- Al-Wabel, M.I., A. Al-Omran, A.H. El-Naggar, M. Nadeem, and A.R. Usman. 2013. Pyrolysis temperature induced changes in characteristics and chemical composition of biochar produced from conocarpus wastes. *Bioresource Technology*. 131: 374-379.
- Angin, D. 2013. Effect of pyrolysis temperature and heating rate on biochar obtained from pyrolysis of safflower seed press cake. *Bioresource Technology*. 128: 593-597.
- Asadullah, M., M.A. Rahman, M.M. Ali, M.S. Rahman, M.A. Motin, M.B. Sultan, and M.R. Alam. 2007. Production of bio-oil from fixed bed pyrolysis of bagasse. *The Science and Technology of Fuel and Energy*. 86: 2514-2520.
- Blanco-Canqui, H. 2017. Biochar and soil physical properties. *Soil Science Society of America Journal*. 81: 687-711.
- Borchard, N., M. Schirrmann, M.L. Cayuela, C. Kammann, N. Wrage-Monnig, J.M. Estavillo, and J. Novak. 2019. Biochar, soil and land-use interactions that reduce nitrate leaching and N₂O emissions: a meta-analysis. *Science of the Total Environment*. 65: 2354-2364.
- Brady, N.C., and R.R. Weil. 2008. *An Introduction to the Nature and Properties of Soils*. 14th edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Brennan, J.K., T.J. Badosz, K.T. Thomson, and K.E. Gubbins. 2001. Water in porous carbons. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 187: 539-568.
- Brown, R. 2009. *Biochar for environmental management science and technology*. Routledge, London.
- Budai, A., L. Wang, M. Gronli, L.T Strand, M.J. Antal Jr, S. Abiven, and D.P. Rasse. 2014. Surface properties and chemical composition of corncob and miscanthus biochars effects of production temperature and method. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 62: 3791-3799.

- Butnan, S., J.L. Deenik, B. Toomsan, M.J. Antal, and P. Vityakon. 2016. Biochar properties influencing greenhouse gas emissions in tropical soils differing in texture and mineralogy. *Journal of environmental quality*. 45: 1509–1519.
- Cao, X., L. Zhong, X. Peng, S. Sun, S. Li, S. Liu, and R. Sun. 2014. Comparative study of the pyrolysis of lignocellulose and its major components: Characterization and overall distribution of their biochars and volatiles. *Bioresource Technology*. 155: 21-27.
- Cárdenas-Aguiar, E., G. Gascó, J. Paz-Ferreiro, and A. Méndez. 2017. The effect of biochar and compost from urban organic waste on plant biomass and properties of an artificially copper polluted soil. *International Biodeterioration and Biodegradation*. 124: 223-232.
- Cayuela, M.L., L. Van Zwieten, B.P. Singh, S. Jeffery, A. Roig, and M.A. Sánchez-Monedero. 2014. Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: A review and meta-analysis. *Agriculture Ecosystems and Environment*. 191: 5-16.
- Cayuela, M.L., S. Jeffery, and L. van Zwieten. 2015. The Molar H:Corg ratio of biochar is a key factor in mitigating N₂O emissions from soil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 202: 135–138.
- Chang, J., D.E. Lay, S.A. Clay, R. Chintala, J.M. Miller, and T. Schumacher. 2016. Biochar reduced nitrous oxide and carbon dioxide emissions from soil with different water and temperature cycles. *Agronomy Journal*. 108: 2214.
- Chintala, R., D.E. Clay, T.E. Schumacher, D.D. Malo, and J.L. Julson. 2013. Optimization of oxygen parameters for determination of Carbon and Nitrogen in biochar materials. *Analytical Letters*. 46: 532-538.
- Collard, F.X., and J. Blin. 2014. A review on pyrolysis of biomass constituents: Mechanisms and composition of the products obtained from the conversion of cellulose hemicelluloses and lignin. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 38: 594-608.
- Cornelissen, G., D.W. Rutherford, H.P.H. Arp, P. Dorsch, C.N. Kelly, and C.E. Rostad. 2013. Sorption of pure N₂O to biochars and other organic and inorganic materials under anhydrous conditions. *Environmental Science and Technology*. 47: 7704-7712.
- Dai, Z., A. Enders, J.L. Rodrigues, K.L. Hanley, P.C. Brookes, J. Xu, and J. Lehmann. 2018. Soil fungal taxonomic and functional community composition as affected by biochar properties. *Soil Biology and Biochemistry*. 126: 159-167.
- Darmstadt, H., D. Pantea, L. Sümmchen, U. Roland, S. Kaliaguine, and C. Roy. 2000. Surface and bulk chemistry of charcoal obtained by vacuum pyrolysis of bark: influence of feedstock moisture content. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 53: 1-17.
- Dhyani, S.K., A. Ram, and I. Dev. 2016. Potential of agroforestry systems in carbon sequestration in India. *Indian Journal of Agricultural Sciences*. 86: 1103-1112.
- Ding, W., X. Dong, I.M. Ime, B. Gao, and L.Q. Ma. 2014. Pyrolytic temperatures impact lead sorption mechanisms by bagasse biochars. *Chemosphere*. 105: 68-74.
- Downie, A., A. Crosky, and P. Munroe. 2009. Physical properties of biochar. *Biochar for environmental Management, Science and technology. Journal of Soil Science*. 1: 13-32.

- Edwards, J.D., C.M. Pittelkow, A.D. Kent, and W.H. Yang. 2018. Dynamic biochar effects on soil nitrous oxide emissions and underlying microbial processes during the maize growing season. *Soil Biology and Biochemistry*. 122: 81-90.
- El-Gamal, E.H., M. Saleh, I. Elsokkary, M. Rashad, and M.M.A. El-Latif. 2017. Comparison between properties of biochar produced by traditional and controlled pyrolysis. *Alexandria Science Exchange Journal*. 38: 412-425.
- Enders, A., K. Hanley, T. Whitman, S. Joseph, and J. Lehmann. 2012. Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance. *Bioresource Technology*. 114: 644-653.
- Fan C, H. Chen, B. Li, and Z. Xiong. 2017 Biochar reduces yield-scaled emissions of reactive nitrogen gases from vegetable soils across China. *Biogeosciences*. 14: 2851–2863.
- FAO. 2020. Emissions due to agriculture. Global, regional and country trends 2000–2018. FAOSTAT Analytical Brief Series No 18. Rome.
- Feng, Y., Y. Xu, Y. Yu, Z. Xie, and X. Lin. 2012. Mechanisms of biochar decreasing methane emission from Chinese paddy soils. *Soil Biology and Biochemistry*. 46: 80-88.
- Fidel, R.B., D.A. Laird, and T.B. Parkin. 2017. Impact of biochar organic and inorganic carbon on soil CO₂ and N₂O emissions. *Journal of Environmental Quality*. 46: 505-513.
- Forster, P., V. Ramaswamy, P. Artaxo, T. Berntsen, R. Betts, D.W. Fahey, J. Haywood, J. Lean, D.C. Lowe, G. Myhre, J. Nganga, R. Prinn, G. Raga, M. Schulz, and R. Van Dorland. 2007. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA.
- Glaser, B., J. Lehmann, and W. Zech. 2002. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal a review. *Biology and Fertility of Soils*. 35: 219-230.
- Grutzmacher, P., A.P. Puga, M.P.S. Bibar, A.R. Coscione, A.P. Packer, and C.A. de Andrade. 2018. Carbon stability and mitigation of fertilizer induced N₂O emissions in soil amended with biochar. *Science of the Total Environment*. 625: 1459-1466.
- Gundale, M.J., and T.H. DeLuca. 2006. Temperature and source material influence ecological attributes of ponderosa pine and Douglas-fir charcoal. *Forest Ecology and Management*. 231: 86-93.
- Gupta, A.K., I.S. Solanki, B.M. Bashyal, Y. Singh, and K. Srivastava. 2015. Bakanae of rice-an emerging disease in Asia. *The Journal of Animal and Plant Sciences*. 25: 1499-1514.
- Gupta, D.K., A. Bhatia, A. Kumar, T.K. Das, N. Jain, R. Tomer, and H. Pathak. 2016. Mitigation of greenhouse gas emission from rice-wheat system of the Indo-Gangetic plains: Through tillage irrigation and fertilizer management. *Agriculture Ecosystems and Environment*. 230: 1-9.
- Gupta, D.K., C.K. Gupta, R. Dubey, R.K. Fagodiya, G. Sharma, A. Keerthika, and A.K. Shukla. 2020. Role of biochar in carbon sequestration and greenhouse gas mitigation. p.141-165. In: Singh J., C. Singh. (eds) *Biochar Applications in Agriculture and Environment Management*. Springer, Cham.

- Han, X., X. Sun, C. Wang, M. Wu, D. Dong, T. Zhong, and W. Wu. 2016. Mitigating methane emission from paddy soil with rice-straw biochar amendment under projected climate change. *Scientific Reports*. 6: 1-10.
- Harsono, S.S., P. Grundman, L.H. Lau, A. Hansen, M.A.M. Salleh, A. Meyer-Aurich, A. Idris, and T.I.M. Ghazi. 2013. Energy balances greenhouse gas emissions and economics of biochar production from palm oil empty fruit bunches. *Resources Conservation and Recycling*. 77: 108-115.
- Harter, J., H.M. Krause, S. Schuettler, R. Ruser, M. Fromme, T. Scholten, and S. Behrens. 2014. Linking N₂O emissions from biochar-amended soil to the structure and function of the N cycling microbial community. *Multidisciplinary Journal of Microbial Ecology*. 8: 660-674.
- Hilber, I., P. Mayer, V. Gouliarmou, S.E. Hale, G. Cornelissen, H.P. Schmidt, and T.D. Bucheli. 2017. Bioavailability and bio accessibility of polycyclic aromatic hydrocarbons from (post-pyrolytically treated) biochars. *Chemosphere*. 174: 700-707.
- IPCC. 1996. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Synthesis Report. Available: <https://www.ipcc.ch/> Accessed Nov. 6, 2021.
- IPCC. 2001. Climate Change 2001: Synthesis Report. A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Watson, R.T. and the Core Writing Team (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA.
- IPCC. 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories., Intergovernmental Panel on Climate Change Institute for Global Environmental Strategies IGES, 2108 - 11, Hayama, Kanagawa (Japan).
- IPCC. 2021. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- Jeffery, S., F.G. Verheijen, C. Kammann, and D. Abalos. 2016. Biochar effects on methane emissions from soils: a meta-analysis. *Soil Biology and Biochemistry*. 101: 251-258.
- Jeffery, S., F.G. Verheijen, M. van der Velde, and A.C. Bastos. 2011. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture Ecosystems and Environment*. 144: 175-187.
- Junpen, A., J. Pansuk, O. Kamnoet, P. Cheewaphongphan, and S. Garivait. 2018. Emission of air pollutants from rice residue open burning in Thailand. *Atmosphere*. 9(11): 449.
- Kajina, W., P. Rousset, W.H. Chen, T. Sornpitak, and J.M. Commandré. 2018. Coupled effect of torrefaction and blending on chemical and energy properties for combustion of major open burned agriculture residues in Thailand. *Renewable Energy*. 118: 113-121.
- Kumar, S., R.E. Masto, L.C. Ram, P. Sarkar, J. George, and V.A. Selvi. 2013. Biochar preparation from *Parthenium hysterophorus* and its potential use in soil application. *Ecological Engineering*. 55: 67-72.
- Laine, J., S. Simoni, and R. Calles. 1991. Preparation of activated carbon from coconut shell in a small scale cocurrent flow rotary kiln. *Chemical Engineering Communications*. 99: 15-23.

- Lal, R., R.F. Follett, B.A. Stewart, and J.M. Kimble. 2007. Soil carbon sequestration to mitigate climate change and advance food security. *Soil science*. 172: 943-956.
- Lee, J., J.H. Jeon, J. Shin, H.M. Jang, S. Kim, M.S. Song, and Y.M. Kim. 2017. Quantitative and qualitative changes in antibiotic resistance genes after passing through treatment processes in municipal wastewater treatment plants. *Science of the Total Environment*. 605: 906- 914.
- Lehmann, J., and S. Joseph. 2009. *Biochar for Environmental Management Science and Technology*. Earthscan, London.
- Lehmann, J., J. Gaunt, and M. Rondon. 2006. Biochar sequestration in terrestrial ecosystems a review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 11: 403-427.
- Lehmann, J., M.C. Rillig, J. Thies, C.A. Masiello, W.C. Hockaday, and D. Crowley. 2011. Biochar effects on soil biota a review. *Soil Biology and Biochemistry*. 43: 1812-1836.
- Leng, L., and H. Huang. 2018. An overview of the effect of pyrolysis process parameters on biochar stability. *Bioresource Technology*. 270: 627-642.
- Liang, C., Z. Li, and S. Dai. 2008. Mesoporous carbon materials: synthesis and modification. *Angewandte Chemie International Edition*. 47: 3696-3717.
- Liu, T., Y. M. Yang, Y. Wu, H. Wang, Y. Chen, and W. Wu. 2011. Reducing CH₄ and CO₂ emissions from waterlogged paddy soil with biochar. *Journal Soils Sediments*. 11: 930-939.
- Major, J., M. Rondon, D. Molina, S.J. Riha, and J. Lehmann. 2010. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. *Plant and Soil*. 333: 117-128.
- Malyan, S.K., A. Bhatia, S.S. Kumar, R.K. Fagodiya, A. Pugazhendhi, and P.A. Duc. 2019. Mitigation of greenhouse gas intensity by supplementing with Azolla and moderating the dose of nitrogen fertilizer. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 20: 101266.
- Masulili, A., W.H. Utomo, and M.S. Syechfani. 2010. Rice husk biochar for rice based cropping system in acid soil 1. The characteristics of rice husk biochar and its influence on the properties of acid sulfate soils and rice growth in West Kalimantan, Indonesia. *Journal of Agricultural Science*. 2: 39.
- Mia, S., F.A. Dijkstra, and B. Singh. 2017. Aging induced changes in biochar's functionality and adsorption behavior for phosphate and ammonium. *Environmental Science and Technology*. 51: 8359-8367.
- Minasny, B., B.P. Malone, A.B. McBratney, D.A. Angers, D. Arrouays, A. Chambers, and L. Winowiecki. 2017. Soil carbon 4 per mille. *Geoderma*. 292: 59-86.
- Mukherjee, R. Lal, and A.R. Zimmerman. 2014. Effects of biochar and other amendments on the physical properties and greenhouse gas emissions of an artificially degraded soil. *Science of the Total Environment*. 487: 26-36.
- Munera-Echeverri, J.L., V. Martinsen, L.T Strand, V. Zivanovic, G. Cornelissen, and J. Mulder. 2018. Cation exchange capacity of biochar: An urgent method modification. *Science of the Total Environment*. 642: 190-197.
- Nan, Q., C. Wang, H. Wang, Q. Yi, and W. Wu. 2020. Mitigating methane emission via annual biochar amendment pyrolyzed with rice straw from the same paddy field. *Science of the Total Environment*. 746: 141351.

- Nelissen, V., G. Ruyschaert, D. Manka'Abusi, T. D'Hose, K. De Beuf, B. Al-Barri, and P. Boeckx. 2015. Impact of a woody biochar on properties of a sandy loam soil and spring barley during a two-year field experiment. *European Journal of Agronomy*. 62: 65-78.
- Nguyen, B.T., J. Lehmann, W.C. Hockaday, S. Joseph, and C.A. Masiello. 2010. Temperature sensitivity of black carbon decomposition and oxidation. *Environmental Science and Technology*. 44: 3324-3331.
- Novak, J.M., W.J. Busscher, D. L. Laird, M. Ahmedna, D.W. Watts, and M.A. Niandou. 2009. Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil. *Soil Science*. 174: 105-112.
- Nsamba, H.K., S.E. Hale, G. Cornelissen, and R.T. Bachmann. 2015. Sustainable technologies for small-scale biochar production—a review. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*. 5: 10.
- ONEP. 2009. National strategy on Climate Change Management (A.D. 2008-2012). Ministry of Natural Resources and Environment, Bangkok.
- Pietikäinen, J., O. Kiikkilä, and H. Fritze. 2000. Charcoal as a habitat for microbes and its effect on the microbial community of the underlying humus. *Oikos journal*. 89: 231-242.
- Pratiwi, E.P.A., and Y. Shinogi. 2016. Rice husk biochar application to paddy soil and its effects on soil physical properties plant growth and methane emission. *Paddy and Water Environment*. 14: 521-532.
- Qin, X.B., Y.E. Li, H. Wang, C. Liu, J.L. Li, Y.F. Wan, Q.Z. Gao, F.L. Fan, and Y.L. Liao. 2016. Long-term effect of biochar application on yield-scaled greenhouse gas emissions in a rice paddy cropping system: A four-year case study in south China. *Science of the Total Environment Sciences*. 569–570: 1390–1401.
- Rafiq, M.K., R.T. Bachmann, M.T. Rafiq, Z. Shang, S. Joseph, and R. Long. 2016. Influence of pyrolysis temperature on physico-chemical properties of corn stover (*Zea mays* L.) biochar and feasibility for carbon capture and energy balance. *PLOS One*. 11: e0156894.
- Rawat, J., J. Saxena, and P. Sanwal, P. 2019. Biochar: a sustainable approach for improving plant growth and soil properties. pp. 1-17. In *Biochar-an imperative amendment for soil and the environment*. London: IntechOpen.
- Rondon, M.A., D. Molina, M. Hurtado, J. Ramirez, J. Lehmann, J. Major, and E. Amezquita. 2006. Enhancing the productivity of crops and grasses while reducing greenhouse gas emissions through bio-char amendments to unfertile tropical soils, pp. 9-15. In *18th World Congress of Soil Science*. Philadelphia, PA: International Union of Soil Sciences.
- Rondon, M.A., J.A. Ramirez, and J. Lehmann. 2005. Greenhouse gas emissions decrease with charcoal additions to tropical soils. In: *Proceedings of the 3rd USDA symposium on greenhouse gases and carbon sequestration*, vol 208, Baltimore, USA.
- Sørensen, C.G., N. Halberg, F.W. Oudshoorn, B.M. Petersen, and R. Dalgaard. 2014. Energy inputs and GHG emissions of tillage systems. *Biosystems Engineering*. 120: 2-14.
- Steiner, C., W.G. Teixeira, J. Lehmann, T. Nehls, J.L.V.de Macedo, and W.E.H. Blum. 2007. Long term effects of manure charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered central Amazonian upland soil. *Plant and Soil*. 292: 275-290.

- Thies, J.E., and M. C Rillig. 2009. Characteristics of biochar: biological properties. *Biochar for environmental management: Science and Technology*. 1: 85-105.
- Tomczyk, A., Z. Sokołowska, and P. Boguta. 2020. Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*. 19: 191-215.
- Tubiello, F.N., M. Salvatore, S. Rossi, A. Ferrara, N. Fitton, and P. Smith. 2013. The FAOSTAT database of greenhouse gas emissions from agriculture. *Environmental Research Letters*. 8: 015009.
- Vance, E.D., P.C. Brookes, and D.S. Jenkinson. 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*. 19: 703-707.
- Verheijen, F., S. Jeffery, A.C. Bastos, M. Van der Velde, and I. Diafas. 2010. Biochar Application to Soils. A critical scientific review of effects on soil properties processes and functions. *JRC Scientific and Technical Reports*. 24099: 162.
- Wang, J., Z. Xiong, and Y. Kuzyakov. 2016. Biochar stability in soil: meta-analysis of decomposition and priming effects. *Bioproducts for a Sustainable Bioeconomy*. 8: 512-523.
- Watson, R.T., L.G., Meira Filho, E. Sanhueza, and A. Janetos. 1992. Greenhouse gases: sources and sinks. *Climate Change*. 92: 25-46.
- Windeatt, J.H., A.B. Ross, P.T. Williams, P.M. Forster, M.A. Nahil, and S. Singh. 2014. Characteristics of biochars from crop residues: potential for carbon sequestration and soil amendment. *Journal of Environmental Management*. 146: 189-197.
- Xiao, K.Q., F. Beulig, H. Røy, B.B. Jørgensen, and N. Risgaard-Petersen. 2018. Methylotrophic methanogenesis fuels cryptic methane cycling in marine surface sediment. *Limnology and Oceanography*. 63: 1519-1527.
- Xu, X., C. Chen, and Z.Q. Xiong. 2016. Effects of biochar and nitrogen fertilizer amendment on abundance and potential activity of methanotrophs and methanogens in paddy field. *Acta Pedologica Sinica*. 53: 1517-1527.
- Yanai, Y., K. Toyota, and M. Okazaki. 2007. Effects of charcoal addition on N₂O emissions from soil resulting from rewetting air-dried soil in short-term laboratory experiments. *Soil Science and Plant Nutrition*. 53: 181-188.
- Yang, H., R. Yan, H. Chen, D.H. Lee, and C. Zheng. 2007. Characteristics of hemicellulose cellulose and lignin pyrolysis. *The Science and Technology of Fuel and Energy*. 86: 1781-1788.
- Yang, X., Y. Lan, J. Meng, W. Chen, Y. Huang, X. Cheng, T. He, T. Cao, Z. Liu, L. Jiang, and J. Gao. 2017. Effects of maize stover and its derived biochar on greenhouse gases emissions and C-budget of brown earth in Northeast China. *Environmental Science and Pollution Research*. 24: 8200-8209.
- Yuan, J.H., and R.K. Xu. 2011. The amelioration effects of low temperature biochar generated from nine crop residues on an acidic Ultisol. *Soil use and Management*. 27: 110-115.
- Zhang, X, C. Chen, X. Chen, P. Tao, Z. Jin, and Z. Han. 2018. Persistent effects of biochar on soil organic carbon mineralization and resistant carbon pool in upland red soil. *Science China Earth Sciences*. 77: 177.
- Zhang, X.L., Y.T. Zhang, R. Liu, J. Xie, J.W. Zhang, W.J. Xu, and X.J. Shi. 2021. Effects of green manure return regimes on soil greenhouse gas emissions. *Acta Prataculturae Sinica*. 30: 25.
- Zhou, Y., B. Gao, A.R. Zimmerman, H. Chen, M. Zhang, and X. Cao. 2014. Biochar-supported zerovalent iron for removal of various contaminants from aqueous solutions. *Bioresource Technology*. 152: 538-542.