

มหัศจรรย์ถ่านชีวภาพกับผลกระทบสองขั้ว

Amazing biochar and its bipolar effects

สมชาย บุตรนันท์^{1,2,*} และ ปัทมา วิตยากร^{2,3}

Somchai Butnan^{1,2,*} and Patma Vityakon^{2,3}

บทคัดย่อ: ถ่านเพื่อปรับปรุงดินหรือที่เรียกว่าถ่านชีวภาพกำลังเป็นที่สนใจอย่างมากในวงการเกษตรและสิ่งแวดล้อม แต่รายงานส่วนใหญ่ชี้ให้เห็นเฉพาะด้านที่เป็นคุณ ซึ่งถ่านมีทั้งคุณและโทษต่อดินและพืช ซึ่งถูกกำหนดด้วยคุณภาพถ่าน (ปริมาณคาร์บอนเสถียร เถ้า และสารระเหยได้) และคุณสมบัติของดิน ถ่านอาจทำให้ดินแน่นทึบเมื่อเกิดการอุดตันของรูดินเนื่องจากขนาดของถ่านเล็กเกินไป ถ่านทำให้ความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืชลดลงหากมีเถ้ามาก โดยทำให้ pH ของดินสูงถึงระดับเป็นด่าง ซึ่งทำให้เกิดการตกตะกอนของธาตุบางชนิด เช่น ฟอสฟอรัสและจุลธาตุ และทำให้เกิดการแข่งขันระหว่างธาตุอาหารที่เป็นไอออนประจุบวก เช่น โพแทสเซียม แคลเซียมและแมกนีเซียม ในการดูดใช้ของพืช หากถ่านมีปริมาณสารระเหยได้มาก จะทำให้พืชขาดไนโตรเจนและสารประกอบบางชนิดในสารระเหยได้เป็นพิษต่อพืชและจุลินทรีย์ดิน นอกจากนี้เพื่อให้แสดงผลในทางบวกต่อดินและพืชจำเป็นต้องใช้ถ่านในปริมาณมาก ซึ่งไม่สอดคล้องกับการผลิตถ่านที่ได้ปริมาณน้อยในแต่ละครั้ง การออกแบบเทคนิคการเผาเพื่อให้ได้ถ่านที่มีคุณสมบัติที่ดี การผสมถ่านกับวัสดุอื่นเพื่อลดปริมาณถ่านที่ต้องใช้ลง และการใช้ถ่านกับพืชที่มีมูลค่าสูง จึงเป็นแนวทางที่จะช่วยเพิ่มผลกระทบด้านบวกหรือด้านดีของถ่านชีวภาพที่ควรนำไปศึกษาต่อไป

คำสำคัญ: การเจริญเติบโตของพืช, คุณและโทษ, คุณสมบัติของดินที่ได้รับถ่าน, ความหมายและการใช้ถ่านชีวภาพ, เทคนิคการผลิต

ABSTRACT: Charcoal used for soil quality improvement so called biochar, has been receiving overwhelming attention in agricultural and environmental circles. Most reports have focused on beneficial side of the material to soil and plants. In fact, there are both sides to biochar's effects on soil and plants depending on its quality (including contents of fixed carbon, ash and volatile matter) and soil properties. Biochar may reduce soil porosity by clogging soil pores due to biochar's small granule sizes. Biochar can also reduce availability of plant nutrients if it has high ash content which increases soil pH to alkaline levels causing precipitation of some nutrients, such as phosphorus and micronutrients. In addition, high-ash biochar can bring about competition for plant uptake among cation nutrients such as potassium, calcium and magnesium. Meanwhile, biochars with high contents of volatile matter can bring about N deficiency in plants. In addition, some volatile compounds are directly toxic to plants and microorganisms. Furthermore, in order for biochars to show positive results to both soils and plants, high quantities are required. This is not compatible with current production capacity of biochar which yield low quantities. A design

¹ สาขาวิชาพืชศาสตร์ คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร สกลนคร 47000

Plant Science Section, Faculty of Agricultural Technology, Sakon Nakhon Rajabhat University, Sakon Nakhon, 47000

² กลุ่มวิจัยการจัดการอินทรีย์วัตถุของดิน มหาวิทยาลัยขอนแก่น ขอนแก่น 40002

Soil Organic Matter Management Research Group, Khon Kaen University

³ สาขาวิชาปฐพีศาสตร์และสิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ขอนแก่น 40002

Department of Soil Science and Environment, Faculty of Agriculture, Khon Kaen University, Khon Kaen, 40002

* Corresponding author: sbutnan@snru.ac.th

of an appropriate pyrolysis technique for good quality biochar production, mixing biochar with other materials in order to reduce quantity of biochar required, and the use of biochar on high valued crops are suggested ways to improve positive effects of biochars which should be further investigated.

Keywords: plant growth, benefits and drawbacks, properties of biochar-treated soils, definition and use of biochar, production techniques

บทนำ

ถ่านเป็นวัสดุเชื้อเพลิงที่เรามีความคุ้นเคย แต่การใช้ถ่านเพื่อปรับปรุงความอุดมสมบูรณ์ของดิน และการเก็บกักคาร์บอนในดิน เป็นการใช้แบบใหม่นอกจากนี้ ถ่านที่นำมาใช้ประโยชน์ในแบบใหม่นี้ยังมีการเรียกขานที่แตกต่างออกไปว่า ถ่านชีวภาพ หรือ ไบโอชาร์ (biochar) ซึ่งการใช้ถ่านในหน้าที่ดังกล่าวเป็นประเด็นที่ได้รับความนิยมและตื่นตัวกันทั่วโลกไม่เว้นแม้แต่ในประเทศไทย โดยในประเทศไทยปรากฏบทความตีพิมพ์ในวารสารวิจัยนานาชาติครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2549 (ค.ศ. 2006) โดย Worasuwannarak et al. (2006) (สืบค้นจากฐานข้อมูล Scopus) ซึ่งผลการวิจัยโดยส่วนใหญ่เป็นการรายงานเฉพาะข้อดีของการใช้ถ่านเพื่อการปรับปรุงดิน นอกจากนี้เป็นที่นิยมในแวดวงการวิจัยแล้ว ยังมีการส่งเสริมการใช้ถ่านเพื่อการเกษตรแก่เกษตรกรด้วย (เช่น กุลจิตฺต, 2560; ศิริลักษณ์ และอรสา, 2556) แต่เมื่อไม่นานมานี้มีผลงานวิจัยและบทความวิชาการบางส่วนที่ได้ชี้ให้เห็นถึงข้อจำกัดและผลด้านลบของถ่านที่มีต่อดินและพืช เช่น Butnan et al. (2015), Deenik et al. (2010), และ Mukherjee and Lal (2014) เพื่อให้เกิดความเข้าใจถึงข้อดีและข้อจำกัดของถ่านที่ใช้ในการปรับปรุงดิน เพื่อให้ผู้ใช้สามารถเลือกถ่านที่มีคุณภาพเหมาะสมกับดินแต่ละดินและใช้ถ่านในการบำรุงดินอย่างมีประสิทธิภาพ บทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเสนอความเป็นมาของการใช้คำว่า ถ่านชีวภาพ เพื่อเรียกขานถ่านที่ใช้ในการปรับปรุงดิน และแสดงให้เห็นว่าถ่านมีทั้งประโยชน์และโทษต่อดินและพืช

ความหมายและการใช้ประโยชน์จากถ่าน

ตามนิยามศัพท์ของ ถ่านชีวภาพ หรือ ไบโอชาร์ โดย Lehmann and Joseph (2009) หมายถึง วัสดุที่มีคาร์บอนอยู่อย่างเข้มข้นผลิตภายใต้กระบวนการให้ความร้อนจากการเผาไหม้ วัสดุที่ใช้ในการผลิตมีหลายชนิด เช่น พืช มูลสัตว์ และของเสีย

จากบ้านเรือนและโรงงานอุตสาหกรรม จากการสืบค้นด้วยฐานข้อมูล Scopus มีการใช้คำนี้ครั้งแรกเมื่อ พ.ศ. 2543 โดย Karaosmanoğlu et al. (2000) และเมื่อสืบค้นด้วย Web of Science พบครั้งแรก พ.ศ. 2544 โดย Purevsuren and Davaajav (2001) หลักฐานนี้ชี้ให้เห็นว่าคำว่า “ถ่านชีวภาพ (biochar)” ได้ถูกบัญญัติเมื่อประมาณ 2 ทศวรรษนี้เอง ซึ่งหมายความว่าคำนี้ถูกสร้างขึ้นมาใหม่เพื่อแสดงถึงวัสดุที่ผ่านกระบวนการเผาไหม้และใช้อย่างจำเพาะเพื่อการปรับปรุงดินและเก็บกักคาร์บอนในดิน (Mukherjee et al., 2011) ทั้งนี้เพื่อไม่ให้ซ้ำซ้อนกับคำว่า “ถ่าน” ที่ในภาษาอังกฤษใช้คำว่า charcoal หรือ char ซึ่งหมายถึงวัสดุที่ผ่านกระบวนการเผาไหม้และใช้ประโยชน์ในการเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน จะเห็นได้ว่าวัสดุชนิดเดียวกันที่เผาด้วยวิธีการเดียวกันและจากการเผาครั้งเดียวกัน เมื่อนำไปใส่ลงในดินเพื่อเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดินและเก็บกักคาร์บอน เรียกว่า “ถ่านชีวภาพ (biochar)” แต่เมื่อนำไปหุงต้มเรียกว่า “ถ่าน (charcoal)” การจะเลือกใช้คำใดขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการนำถ่านไปใช้เป็นสำคัญ

นอกจากคำว่าถ่านชีวภาพแล้ว ยังมีการใช้คำอื่นที่หมายถึงวัสดุสีดำที่ใช้ประโยชน์ด้านการเกษตรเป็นหลัก เช่นคำว่า ถ่านเพื่อการเกษตร (agrichar) คาร์บอนดำ (black carbon) คาร์บอนชีวภาพ (biocarbon) คาร์บอนอินทรีย์ที่มีการเผาไหม้ (pyrogenic organic carbon) ถ่านชีวภาพที่มีการเผาไหม้ (pyrogenic biochar) ถ่านชีวภาพผลิตโดยวิธีเผาไหม้โดยใช้น้ำร้อนและความดันสูง (hydrothermal biochar) (Butnan, 2015) ดังนั้นการใช้ถ่านเพื่อปรับปรุงดินจึงไม่จำเป็นต้องใช้คำว่าถ่านชีวภาพหรือไบโอชาร์ เสมอไป

เกี่ยวกับการใช้ศัพท์คำว่าถ่านชีวภาพนี้ ในการประชุม Arbeitskreis für die Nutzbarmachung von Siedlungsabfällen Symposium 2011 ซึ่งเป็นการประชุมเกี่ยวกับการใช้ถ่านเพื่อการอยู่อาศัย

ในสภาพภูมิอากาศโลกที่เปลี่ยนแปลง จัดขึ้น ณ กรุงเบอร์ลิน ประเทศเยอรมนี เมื่อ พ.ศ. 2554 ได้มีการเรียกร่องไม้ให้ใช้คำว่า “ไบโอชาร์ (biochar)” โดยให้ตัดคำว่า “bio” ออกไป โดยให้ใช้คำว่า “ถ่านที่ผลิตมาจากพืช (plant charcoal)” แทน เนื่องจากทำให้เกิดความเข้าใจผิด (Woods End Laboratories, 2011)

เนื่องจากยังมีการถกเถียงกันอยู่ในการใช้คำศัพท์ เพื่อให้มีความเข้าใจตรงกัน ดังนั้น บทความนี้จะใช้คำว่า “ถ่านชีวภาพ” เพื่อสื่อความหมายถึงถ่านที่ใช้เพื่อวัตถุประสงค์ในการปรับปรุงความอุดมสมบูรณ์ของดิน และการเก็บกักคาร์บอนในดิน

เทคนิคการผลิตถ่านชีวภาพ

ในปัจจุบันการผลิตถ่านชีวภาพมีหลายเทคนิค ซึ่งแตกต่างกันไปตามอุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อน และชนิดเตา เทคนิคที่ใช้ในการผลิตถ่านชีวภาพประกอบด้วย (1) การเผาแบบให้ความร้อนอย่างช้า (slow pyrolysis) เป็นการเผาภายใต้อุณหภูมิตั้งแต่ 300-500°C. (Manya, 2012) และมีเวลาในการไล่ความชื้นที่เป็นไอน้ำ (vapor residence time) 5-30 นาที (Mohan et al., 2006) การผลิตถ่านวิธีนี้รวมถึงการเผาแบบดั้งเดิมของไทยและประเทศเพื่อนบ้าน (เช่น ลาว) เช่น เตาอบและเตาผี การเผาแบบให้ความร้อนอย่างช้าในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยสามารถผลิตถ่านชีวภาพโดยเฉลี่ยแล้วได้เพียง 4 กก./วัน (สมชาย บุตรนันท์ ข้อมูลยังไม่ได้ตีพิมพ์)(2) การเผาที่ให้ความร้อนอย่างรวดเร็ว (fast pyrolysis) มีการให้อุณหภูมิสูงสุด 500-550°C. (Manya, 2012) และมีการให้อัตราความร้อนอย่างรวดเร็ว คือ 1,000 -10,000°C./วินาที และเวลาในการไล่ความชื้นประมาณ 2 วินาที (Mohan et al., 2006) (3) การเผาที่ให้ความร้อนแบบฉับพลัน (Flash Carbonization™) เป็นเทคนิคที่พัฒนาขึ้นโดยสถาบันพลังงานแห่งชาติของฮาวาย (Hawaii National Energy Institute) เมื่อประมาณปี พ.ศ. 2533 โดยมีศาสตราจารย์ ไมเคิล เจ. แอนทัล (Prof. Michael J. Antal) แห่งมหาวิทยาลัยฮาวาย เป็นหัวหน้าทีมงาน เทคนิคนี้ให้ความร้อนสูงสุด 600-800°C. เพื่อเปลี่ยนคาร์บอนอินทรีย์ในสารอินทรีย์วัตถุดิบให้เป็นก๊าซเชื้อเพลิง เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น และมีเวลาในการทำปฏิกิริยาด้วยความร้อน

(thermal-reaction time) น้อยกว่า 30 นาที (Butnan, 2015) เทคนิคการเผาที่ให้ความร้อนแบบฉับพลันนี้สามารถผลิตถ่านชีวภาพจากไม้ยูคาลิปตัสได้ 21.8 กก./ครั้ง ไม้กระถิน 14.5 กก./ครั้ง และเปลือกมะคาเดเมีย 3.13 กก./ครั้ง (Antal et al., 1996) ซึ่งสามารถผลิตได้วันละ 1 ครั้ง (4) การเผาเพื่อให้ได้ก๊าซเชื้อเพลิง (gasification) เป็นเทคนิคที่ให้ความร้อนมากกว่า 800°C. มีการใช้ออกซิเจนเมื่อเริ่มให้ความร้อน และมีการผลิตก๊าซภายใต้ความร้อนต่ำ คือ 837-2,388 กก.-แคลอรี (3.5-10 เมกะจูล/นิวตัน-ม.) และ (5) การผลิตถ่านชีวภาพโดยวิธีใช้ความร้อนจากไอน้ำ (hydrothermal carbonization) เป็นเทคนิคที่ใช้ผลิตถ่านชีวภาพโดยใช้วัตถุดิบที่มีความชื้นภายใต้ อุณหภูมิ 120 – 280°C.

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าจะมีเทคนิคที่ใช้ในการผลิตที่หลากหลายเพื่อให้ได้ถ่านชีวภาพที่มีคุณสมบัติที่ต้องการ แต่ส่วนใหญ่แล้วเป็นเทคนิคที่ยังอยู่ในขั้นตอนการพัฒนา และศึกษาโดยใช้เครื่องต้นแบบที่มีขนาดเล็ก ดังนั้นปริมาณที่ผลิตได้และต้นทุนการผลิตจึงยังต้องมีการศึกษาต่อไป (Lykes et al., 2015)

ถ่านชีวภาพกับการปรับปรุงความอุดมสมบูรณ์ของดิน: ข้อดีและข้อด้อย

คล้ายกับการตื่นทองที่รัฐแคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา เมื่อปี พ.ศ. 2391 (ค.ศ. 1848) การให้ความสนใจและความสำคัญกับถ่านชีวภาพอย่างมากนับตั้งแต่ 2 ทศวรรษที่ผ่านมา เป็นผลพวงมาจากงานวิจัยเมื่อ พ.ศ. 2509 โดย Sombroek (1966) นักปฐพีวิทยาชาวเนเธอร์แลนด์ ในหนังสือ “Amazon Soils: A Reconnaissance of the Soils of the Brazilian Amazon Region” ที่ค้นพบดินชนิดหนึ่งที่มีสีดำและในชั้นดินด้านล่างประกอบด้วยเครื่องปั้นดินเผาและถ่าน ดินชนิดนี้พบเฉพาะในบริเวณที่เป็นแหล่งชุมชน หรือเคยเป็นชุมชนโบราณ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าเป็นดินที่มนุษย์จงใจทำให้เป็นเช่นนั้น ดินชนิดนี้เรียกในภาษาท้องถิ่นว่า *Terra Preta de Indio* หรือ Indian dark earth ที่แปลว่า ดินดำอินเดียน และมีการค้นพบในภายหลังว่าถ่านที่อยู่ในดินดังกล่าวมีอายุมากกว่า 1,000 – 15,000 ปี โดย Glaser (1999) อ้างตาม Glaser et al., (2001) และดินชนิดนี้มีความอุดมสมบูรณ์มากกว่าดินที่อยู่รอบๆ ซึ่งเป็นชุดดินเดียวกันถึง 70 เท่า (Glaser et al., 2001)

ซึ่งข้อมูลดังกล่าวนี้เป็นที่ทราบโดยทั่วไปในหมู่นักวิจัยที่สนใจศึกษาฤทธิ์ของถ่านชีวภาพต่อการผลิตพืชเห็นได้อย่างชัดเจนจากที่มีการอ้างข้อมูลนี้ซ้ำแล้วซ้ำอีก จากการสืบค้นในฐานข้อมูล Scopus พบว่าจากปี พ.ศ. 2543 ถึง 2561 มีการอ้างถึงคุณประโยชน์ของ *Terra Preta de Indio* ในบทความวิจัย 181 ฉบับ และการอ้างถึง Indian dark earth ในบทความจำนวน 523 ฉบับ ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะอ้างถึงคำเหล่านี้ในช่วงทศวรรษแรกของทศวรรษถ่านชีวภาพ คือประมาณ พ.ศ. 2543 - 2553

ดังที่กล่าวมาแล้วว่าการวิจัยส่วนใหญ่โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศไทยชี้ให้เห็นเฉพาะความดีเด่นของการใช้ถ่านชีวภาพ ซึ่งผลกระทบในด้านลบของถ่านชีวภาพถูกละเว้นในการนำเสนอ ดังนั้นในส่วนนี้จะนำเสนอให้เห็นผลกระทบทั้งด้านบวกและลบของการใช้ถ่านชีวภาพเพื่อปรับปรุงดิน

ความหนาแน่นของดิน

คุณสมบัติที่โดดเด่นของถ่านชีวภาพประการหนึ่งคือ ลดความหนาแน่นของดิน (Laird et al., 2010) เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความพรุนสูง ค่าความหนาแน่นรวม (bulk density) ของถ่าน มีค่าระหว่าง 0.25 – 0.30 ก./ลบ.ซม. (Zhang et al., 2010) และการวิจัยบางชิ้นรายงานอยู่ในช่วง 0.30 – 0.43 ก./ลบ.ซม. (Pastor-Villegas et al., 1993) ในขณะที่ดินมีค่าความหนาแน่นรวม 0.80 – 1.75 ก./ลบ.ซม. (Wilke, 2005) ซึ่งสูงกว่าถ่านอย่างน้อย 2 เท่าตัว ถ่านสามารถลดความหนาแน่นของดินได้เนื่องจากเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า อธิพิพลของการเจือจาง (dilution effect) นอกจากนี้ถ่านชีวภาพยังทำให้อนุภาคดินจับกลุ่มกันเกิดเป็นเม็ดดิน (Brodowski et al., 2006; Golchin et al., 1994) อย่างไรก็ตาม มิงานวิจัยจำนวนมากที่เปิดเผยมว่าถ่านสามารถเคลื่อนที่ลงตามหน้าตัดดินและสะสมที่ดินชั้นล่างได้ เช่นจากรายงานของ Foereid et al. (2011) และ Zhang et al. (2010) และถ่านที่เคลื่อนที่ลงไปตามหน้าตัดดินมีขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร (Zhang et al., 2010) ซึ่งสามารถเคลื่อนที่ผ่านรูดินขนาดกลาง (mesopore) ซึ่งมีขนาดอยู่ในช่วง 10 – 1,000 ไมโครเมตร (Luxmoore, 1981) พฤติกรรมเช่นนี้ของถ่านชีวภาพอาจทำให้อุบัติการณ์การอุดตัน ทำให้น้ำไม่สามารถซึมผ่านได้และทำให้เกิดการขังของน้ำในที่สุด นอกจากการขังน้ำในดิน

และทำให้พืชชะงักการเจริญเติบโตแล้ว ยังเป็นการกระตุ้นให้มีการสร้างและปลดปล่อย CH_4 และ N_2O สู่อากาศ (Butnan, 2015)

ความชื้นดิน

แม้ว่าผลการศึกษาที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าถ่านชีวภาพทำให้ความชื้นของดินเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับดินที่ไม่ใส่ถ่านชีวภาพ เช่น ความชื้นของดินเนื้อทรายเพิ่มขึ้นจาก 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เป็น 17 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เมื่อใส่ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากต้นข้าวสาลีอัตรา 5.5 ตัน/ไร่ (Ahmed et al., 2016) ความชื้นที่ความจุสนามของดินเนื้อร่วนเหนียวเพิ่มจาก 41 เป็น 44 ลบ.ซม./ลบ.ซม. เมื่อใส่ถ่านผสมที่ผลิตจากต้นข้าวโพดและเปลือกถั่วลิสงอัตรา 1.25 ตัน/ไร่ (Ma et al., 2016) แต่เพื่อให้เห็นผลดังกล่าวต้องใช้ถ่านชีวภาพในปริมาณมาก แต่ปริมาณถ่านชีวภาพที่ผลิตได้ เช่น ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือผลิตได้เพียง 4 กก./วัน (สมชาย บุตรนันท์ ข้อมูลยังไม่ได้ตีพิมพ์) หากต้องการใช้ถ่าน 1.25 ตัน ซึ่งเป็นอัตราต่ำที่สุดในพื้นที่ 1 ไร่ ตามรายงานของ Ma et al. (2016) จะต้องใช้เวลาในผลิตถึง 10 เดือน กับอีก 12 วันครึ่ง ดังนั้น แนวทางที่ควรนำไปพิจารณา คือ การออกแบบเทคนิคการผลิตถ่านชีวภาพที่มีคุณสมบัติในการเพิ่มความชื้นในดินโดยที่ไม่ต้องใช้ในปริมาณมาก การผสมถ่านชีวภาพกับวัสดุอื่นและการใช้กับพืชที่มีมูลค่าสูง เช่น พืชผักต่างๆ ก็อาจเป็นการเพิ่มผลตอบแทนทางเศรษฐกิจในการใช้ถ่านชีวภาพได้

ความเป็นกรด-ด่างของดิน

เนื่องจากความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืชขึ้นอยู่กับ pH ของดิน และส่วนใหญ่แล้วธาตุอาหารที่จำเป็นต่อพืชมีอยู่ในช่วง pH ที่เป็นกลางคือประมาณ pH 6.5 – 7.5 (Mengel and Kirkby, 2001) การใส่ถ่านที่ปริมาณมากเกินไปอาจทำให้ pH ของดินสูงเกินไป และอาจทำให้พืชขาดธาตุได้ (Kamprath, 1971) ยกตัวอย่างเช่น จากการศึกษาของ สมชาย และคณะ (2558) และ Butnan (2015) พบว่าการใส่ถ่านที่มีปริมาณถ่าน 3.9 เปอร์เซ็นต์ในดินเนื้อทราย เช่น ชุดดินโคราช ทำให้พืชขาดแมงกานีสและเหล็ก ความเป็นกรด-ด่าง หรือ pH ของดินมีอิทธิพลโดยตรงต่อความเป็นประโยชน์ของ

ธาตุอาหารพืช (Mengel and Kirkby, 2001) และการทำงานของจุลินทรีย์ดิน (Hubbell, 1971) โดยปกติแล้วการเพิ่ม pH ของดินทำได้โดยใช้สารปูนต่างๆ เช่น โดโลไมต์ ยิปซัม และแคลเซียมคาบอเนต มีการศึกษาจำนวนมากที่แสดงให้เห็นว่าถ่านช่วยเพิ่ม pH ของดินกรด เช่นในการศึกษาของ Berek et al. (2011), Deenik et al. (2011), Chan et al. (2007), Chan et al. (2008) และ Hossain et al. (2010) และบางรายงานที่แสดงให้เห็นว่าถ่านชีวภาพทำให้ pH ลดลง ได้แก่ ถ่านที่ผลิตจากไม้สนโลคัสต์ (pine-locust wood) ทำให้ pH ของดินต่างลดลงจาก pH 8.7 – 9.0 เป็น pH 8.4 อิทธิพลที่ตรงกันข้ามของถ่านชีวภาพต่อ pH ของดิน ได้รับอิทธิพลจากปัจจัย pH เริ่มต้นของดินและถ่านชีวภาพ (Butnan, 2015) การเพิ่ม pH ของดินยังทำให้ความเป็นพิษของธาตุบางชนิดลดลง เช่น อะลูมิเนียม (Al) (Berek et al., 2011; Hossain et al., 2010; Yamato et al., 2006; van Zwieten et al., 2010) เหล็ก (Fe) และแมงกานีส (Mn) (Butnan et al., 2015) ทั้งนี้เนื่องจาก pH ที่เพิ่มขึ้นจากการใส่ถ่านชีวภาพทำให้ธาตุเหล่านี้ตกตะกอนซึ่งเป็นเป็นรูปที่ไม่เป็นพิษกับพืช

นอกจาก pH ที่เพิ่มขึ้นจากการใส่ถ่านชีวภาพทำให้พืชขาดธาตุอาหารบางชนิดแล้ว ยังอาจทำให้โครงสร้างของดินถูกทำลาย (McLean, 1971) เมื่อ pH เพิ่มขึ้นทำให้พลังงานที่เกี่ยวข้องกับความสามารถในการสร้างพันธะของแคลเซียมลดลง และทำให้มีการสูญเสียแคลเซียมไปกับน้ำที่ซาบซึมลงไปตามหน้าตัดดิน ซึ่งแคลเซียมเป็นธาตุที่มีสำคัญต่อการเชื่อมอนุภาคดินให้เป็นเม็ดดิน (McLean, 1971) นอกจากนี้ Butnan et al. (2017) ยังพบว่า การใส่ถ่านชีวภาพทำให้เม็ดดินแตก ในชุดดินวาเฮียวา (Wahiawa soil) ซึ่งเป็นดินในอันดับออกซิซอล (Oxisols) ที่มีปริมาณแมงกานีสมาก เนื่องจากถ่านมีคุณสมบัติเป็นตัวรีดิวซ์แล้วไปทำปฏิกิริยารีดิวซ์แมงกานีส ที่ทำให้ความสามารถในการสร้างพันธะของแมงกานีสลดลง ซึ่งแมงกานีสทำหน้าที่เชื่อมอนุภาคดินให้เป็นเม็ดดิน

อิทธิพลทางลบของถ่านชีวภาพต่อการเจริญเติบโตของพืช

ข้อดีต่างๆ ของถ่านชีวภาพต่อพืช ได้มีการเสนอเอาไว้แล้วในบทความจำนวนมาก เช่น กุลธิดา (2560), เกศศิริรินทร์ และคณะ (2557ก,ข), ศิริลักษณ์

และอรสา (2556) และ Lehmann (2006) ในบทความนี้จะกล่าวถึงอิทธิพลด้านลบของถ่านชีวภาพต่อพืชซึ่งเป็นแง่มุมอีกด้านหนึ่งของถ่านชีวภาพ ซึ่งยังมีกรกล่าวถึงน้อยกว่า ในปัจจุบันเริ่มมีการเปิดเผยถึงข้อเสียของถ่านชีวภาพต่อการเจริญเติบโต หรือแม้แต่ต่อผลผลิตของพืชหลายชนิด (Table 1) เช่น ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้ยูคาลิปตัสที่ลดการเจริญเติบโตของข้าวโพด (Butnan et al., 2015) และมะเขือเทศ (Nzanza et al., 2012) ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้ไผ่ที่ลดการเจริญเติบโตของข้าวสาลี (Aguilar-Chavez et al., 2012) ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้ลาร์ชญี่ปุ่น (Makoto et al., 2011) และไม้สะวันนา (Yeboah et al., 2009) ที่ลดการเจริญเติบโตของ Gmelin larch (*Larix gmelinii*) และข้าวโพด ตามลำดับ นอกจากนี้ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้แล้ว ถ่านที่ผลิตจากเศษวัสดุที่เหลือจากการนำผลผลิตพืชไปใช้ประโยชน์ เช่น เปลือกมะคาเดเมีย (Deenik et al., 2011) เปลือกสน (Rajkovich et al., 2012) ชังข้าวโพด (Deenik et al., 2010) และแกลบ (Haefele et al., 2011) หรือแม้แต่จากมูลสัตว์ (Chan et al., 2008) ก็ทำให้การเจริญเติบโตของพืชลดลง

องค์ประกอบที่สำคัญของถ่านชีวภาพที่กำหนดว่าถ่านคุณภาพดีหรือเลว คือคาร์บอนเสถียร (fixed carbon) เถ้า (ash) สารที่ระเหยได้ (volatile matter) (สมชาย และคณะ 2558; Butnan et al., 2015; Deenik et al., 2010, 2011) ถ่านชีวภาพที่ผลิตด้วยอุณหภูมิต่ำจะมีปริมาณเถ้าต่ำแต่มีสารระเหยได้สูง แต่ปริมาณขององค์ประกอบเหล่านี้จะมีปริมาณในทางตรงกันข้ามหากผลิตด้วยอุณหภูมิสูง อย่างไรก็ตาม องค์ประกอบเหล่านี้ยังขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ด้วย (Antal and Gronli, 2003) ถ่านชีวภาพที่มีปริมาณสารระเหยได้สูงทำให้การเจริญเติบโตของพืชลดลงเนื่องจาก สารระเหยได้มีสารประกอบที่จุลินทรีย์ใช้ง่าย (labile C) และที่มีค่า C:N สูง เช่น โอลิโกแซคคาไรด์ (oligosaccharides) และฟีนอลส์ (phenols) เป็นต้น สารเหล่านี้ทำให้พืชขาดไนโตรเจนโดยกระบวนการ N immobilization (Deenik et al., 2010, 2011; Spokas et al., 2011)

นอกจากสารระเหยทำให้พืชขาดไนโตรเจนแล้ว ยังมีฤทธิ์ที่เป็นพิษกับพืชด้วย เช่น โพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (polycyclic aromatic hydrocarbon, PAH) เช่น แนฟทาลีน

Table 1 Deleterious effects of biochar on plant growth

Deleterious effect of biochar on plant	Test plant	Biochar feedstock	Biochar application rate	Soil	Reference
Nitrogen immobilization due to high volatile matter content of biochar	Corn	Corn cob	2.5% w/w	Clayey soil	Deenik et al. (2010)
Nitrogen immobilization due to high volatile matter content of biochar	Corn and lettuce	Macadamia nut shell	10% and 20% w/w	Sandy loam and clayey soils	Deenik et al. (2011)
Potassium antagonism on Ca and Mg due to high ash content biochar	Corn	Eucalyptus wood	4% w/w	Sandy loam soil	Butman et al. (2015)
Manganese and iron deficiencies due to high ash content biochar	Corn	Eucalyptus wood	4% w/w	Sandy loam soil	Butman et al. (2016)
Nitrogen and phosphorus deficiencies due to high pH biochar	Gmelin larch	Japanese larch wood	50% w/v	Sand	Makoto et al. (2011)
-Nutrient deficiencies due to high pH of biochar	Corn	Corn stover, hazelnut shell, oak wood, pine wood, dairy manure, paper mill waste, and poultry with sawdust bedding	2% w/w	Silt loam soil	Rajkovich et al. (2012)
-N immobilization due to high C:N ratio of biochar	Radish	Poultry litter	1.6, 4, and 8 t/rai	An Alfisol (texture not shown)	Chan et al. (2008)
Nitrogen deficiency	Corn	Savannah wood	0.48 t/rai	Silt loam soil	Yeboah et al. (2009)
Decreased shoot biomass of corn due to decreased nitrogen and phosphorus uptakes	Tomato	Eucalyptus	0.8 t/rai	Sandy loam	Nzanza et al. (2012)
Decreased root weight of tomato and leaf phosphorus content	Wheat	Netleaf oak	4.5% w/w	Sandy loam	Aguiar-Chdvez et al. (2012)
Inhibited wheat growth	Rice	Rice husk	6.6 t/rai	Clayey soil	Haefele et al. (2011)
Decreased rice yield					

(naphthalene) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในถ่านที่ผลิตจากไม้ยูคาลิปตัส (Barbosa et al., 2006) สารเหล่านี้ทำให้การงอกของพืชออกจากเมล็ดช้าลงและชะงักการเจริญเติบโตของพืช (Henner et al., 1999) นอกจากนี้ PAH แล้วยังมีสารประกอบที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น ไฮโดรควิโนน (hydroquinone), แคทีคอล (catechol), กรดแอสคอร์บิก (ascorbic acid), กรดซิตริก (citric acid), กรดเอทิลีนไดอะมีนเตตราอะซีติก (ethylenediamine tetraacetic acid), และ กรดซาลิไซลิก (salicylic acid) เป็นสารที่มีศักยภาพที่จะเป็นพิษต่อพืช (Iman et al., 2006)

ปริมาณเถ้าเป็นอีกองค์ประกอบหนึ่งของถ่านที่กำหนดคุณภาพของถ่านชีวภาพ องค์ประกอบที่ทำให้เถ้ามี pH สูง คือ สารประกอบออกไซด์ต่างๆ เช่น ไดฟอสเฟตไฮดรอกไซด์ (K_2O) และ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) (Butnan, 2015) นอกจากนี้ การสูญเสียหมู่ฟังก์ชันที่มีฤทธิ์เป็นกรด เช่น หมู่คาร์บอกซิล (carboxyl groups) ซึ่งจะสูญเสียไปมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการเผาเพิ่มขึ้น เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ถ่านชีวภาพมี pH สูง (Mukherjee et al., 2011) pH เป็นคุณสมบัติที่สำคัญของดินที่กำหนดความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืช (Mengel and Kirkby, 2001) เมื่อใส่ถ่านที่มีเถ้ามากหรือมี pH สูง ทำให้ธาตุอาหารพืชส่วนใหญ่ไม่อยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ฟอสฟอรัส และ จุลธาตุ (Mengel and Kirkby, 2001; McLean, 1971) ดังที่ Makoto et al. (2011) พบว่าการใส่ถ่านชีวภาพที่มีค่า pH 9.6 ในปริมาณ 50% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ทำให้ส่วนเหนือดิน (ต้นและใบ) และ รากของ *Gmelin larch* มีการเจริญเติบโตลดลงเนื่องจากการขาดธาตุของพืช ทั้งนี้ผลการศึกษาของ Rajkovich et al. (2012) ก็พบในทำนองเดียวกัน นอกจากอิทธิพลของ pH แล้วถ่านชีวภาพที่มีปริมาณเถ้าสูงทำให้มีธาตุอาหารที่เป็นไอออนประจุบวกมาก เช่น โพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม และซิลิกอนธาตุในรูปไอออนประจุบวกเหล่านี้เป็นปฏิปักษ์ซึ่งกันและกันในการดูดใช้ของพืช เช่น Butnan et al. (2015) พบว่าถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้ยูคาลิปตัสที่มีปริมาณเถ้า 3.85 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้ข้าวโพดขาดธาตุแคลเซียมและแมกนีเซียมเนื่องจากการดูดใช้โพแทสเซียมมากเกินไป ปรัชญาการณีนี้นี้เรียกว่า K เป็นปฏิปักษ์ (K antagonism) นอกจากนี้ Butnan (2015) ยังพบอีกว่าซิลิกอนที่มีในปริมาณมาก

ในเถ้าจะไปจำกัดการดูดใช้แมงกานีสและเหล็กของข้าวโพดที่ปลูกในดินเนื้อทราย นอกจากนี้ ถ่านชีวภาพที่มีเถ้าสูงทำให้พืชชะงักการเจริญเติบโตเนื่องจากความเป็นพิษของโซเดียม ซึ่งแสดงให้เห็นผลการทดลองของ Rajkovich et al. (2012)

จะเห็นได้ว่าถ่านจะมีคุณสมบัติหรือโทษต่อพืชขึ้นอยู่กับปริมาณองค์ประกอบที่สำคัญคือ เถ้าและสารระเหย สิ่งสำคัญคือ การสร้างสรีรค์เทคโนโลยีที่สามารถเผาถ่านชีวภาพที่มีคุณภาพดี ซึ่ง Butnan and Vityakon (2017) พบว่าถ่านชีวภาพที่มีคุณภาพดีเหมาะสำหรับเป็นวัสดุบำรุงดินควรมีปริมาณเถ้า 1.6 – 2.8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และสารระเหย 20.4 – 35.8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เช่นถ่านชีวภาพที่ผลิตจากต้นเลี่ยน (*Melia azedarach*) ส่วนถ่านชีวภาพที่มีคุณภาพเลว คือมีปริมาณเถ้าสูงกว่า 3.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (Butnan et al., 2015) เช่น ถ่านที่ผลิตจากวัชตูดิบได้แก่ กระถินยักษ์ (*Leuceana leucocephala*) สนประติพิทธ์ (*Casuarina junghuhniana*) สะแก (*Combretum quadrangulare*) และอะระจาง (*Peltophorum dasyrachis*) (Butnan and Vityakon, 2017) และมีปริมาณสารระเหยได้มากกว่า 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เช่น ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากซังข้าวโพด (Deenik et al., 2011) อย่างไรก็ตาม เทคนิคการผลิตถ่านชีวภาพจะเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อปริมาณสารระเหยได้ และเถ้าดังที่ได้กล่าวไปแล้วด้วย

สรุป

การให้ความสนใจอย่างมากในการใช้ถ่านเพื่อการเกษตร หรือที่เรียกว่า “ถ่านชีวภาพ” ได้เกิดขึ้นทั่วโลกและประเทศไทยคือหนึ่งในนั้น ถ่านชีวภาพไม่ได้มีคุณสมบัติต่างจากถ่านทั่วไปที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง แต่ต่างกันที่วัตถุประสงค์ของการใช้เท่านั้น ถ่านชีวภาพมีวัตถุประสงค์ของการใช้เพื่อปรับปรุงดินที่ใช้ปลูกพืช ถึงแม้ว่าชื่อเขียนต่างๆ มักเน้นด้านที่เป็นคุณของถ่าน แต่บทความนี้ได้แสดงให้เห็นถึงโทษของถ่านชีวภาพต่อดินและพืช ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณภาพของถ่านอันหมายถึงปริมาณขององค์ประกอบคาร์บอนเสถียร เถ้าและสารระเหยได้ เถ้าในปริมาณสูงมีผลเสียต่อความเป็นประโยชน์และการดูดใช้ธาตุอาหารของพืช ส่วนสารระเหยได้ใน

ปริมาณสูงมีผลเสียเพราะทำให้พืชขาดไนโตรเจน และอาจเป็นพิษต่อพืชโดยตรง นอกจากนี้ ยังมีข้อจำกัดในด้านปริมาณถ่านชีวภาพที่ผลิตในแต่ละครั้งได้น้อย เมื่อเทียบกับปริมาณที่ต้องใช้เป็นจำนวนมากเพื่อให้เกิดผลที่ดีต่อทั้งดินและพืช ดังนั้นการออกแบบเทคนิคการผลิตถ่านให้มีคุณภาพดี รวมทั้งการใช้ถ่านร่วมกับวัสดุอื่นเพื่อลดปริมาณถ่านที่ต้องใช้ลง และการใช้ถ่านกับพืชที่มีมูลค่าสูงจึงเป็นแนวทางเลือกและโจทย์วิจัยเพื่อศึกษาต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- กุลธิดา สะอาด. 2560. มารู้อักถ่านชีวภาพกันเถอะ. นิตยสาร สสวท. 45(205): 14-17.
- เกศศิริรินทร์ แสงมณี, ชัยนาม ดิษฐาพร, และ สุรัชย์ สุวรรณชาติ. 2557ก. การจัดการดินด้วยเทคโนโลยีชีวภาพในการผลิตผักคะน้าในดินทราย. ว. วิทย. กษ. 45(2): 605-608.
- เกศศิริรินทร์ แสงมณี, วีระรัตน์ ชินแสน, และ ณัฐพงษ์ พันธุ์ภา. 2557ข. การศึกษาอัตราส่วนของถ่านชีวภาพต่อคุณสมบัติทางเคมีของดินปลูก การเจริญเติบโตและผลผลิตของผักกาดสลัดกรีนคอส (*Lectuca sativa* L. cv. Green Cos). น. 746 – 752. ใน: การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 53. 3-6 กุมภาพันธ์ 2558. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- ศิริลักษณ์ ศิริสิงห์, และอรสา สุกสว่าง. 2556. การประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพในการปรับปรุงดินเพื่อการเกษตร. ว. สังคมศาสตร์และมนุษยศาสตร์ 39(2): 212-225.
- สมชายบุตรนันท์, Jonathan L. Deenik, บรรยง ทูมแสน, Michael J. Antal, และปัทมา วิตยากร. 2558. คุณสมบัติถ่านที่มีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโตของข้าวโพดในดินทรายของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ. แก่นเกษตร 43 (พิเศษ 1): 354-359.
- Aguilar-Chávez, A., M. Díaz-Rojas, M.d.R. Cárdenas-Aquino, L. Dendooven, M. Luna-Guido. 2012. Greenhouse gas emissions from a wastewater sludge-amended soil cultivated with wheat (*Triticum* spp. L.) as affected by different application rates of charcoal. Soil Biol. Biochem. 52: 90-95.
- Ahmed, F., E. Arthur, F. Plauborg, and M.N. Andersen. 2016. Biochar effects on maize physiology and water capacity of sandy subsoil. Mech. Agric. Conserv. Resour. 6:46 – 51.
- Antal, M.J., and M. Gronli. 2003. The art, science, and technology of charcoal production. Ind. Eng. Chem. Res. 42: 1619-1640.
- Antal, M.J., E. Croiset, X. Dai, C. DeAlmeida, W.S. Mok, and N. Norberg. 1996. High-yield biomass charcoal. Energy Fuels. 10:652-658.
- Barbosa, J.M.d.S., N. Re´-Poppi, and M. Santiago-Silva. 2006. Polycyclic aromatic hydrocarbons from wood pyrolysis in charcoal production furnaces. Environ. Res. 101: 304–311.
- Berek, A.K., N.V. Hue, and A. Ahmad. 2011. Beneficial use of biochar to correct soil acidity. Hānai’Ai / The Food Provider.
- Brodowski, S., B. John, H. Flessa, and W. Amelung. 2006. Aggregate-occluded black carbon in soil. Eur. J. Soil Sci. 57: 539-546.
- Butnan, S. 2015. Biochars differing in properties and rates impacting soil-plant and greenhouse gases in different textured and mineralogy soils. Ph.D. Thesis. Khon Kaen University, Khon Kaen.
- Butnan, S., and P. Vityakon. 2017. Kiln and wood types affecting charcoal quality: Charcoal use as soil amendments in Northeast Thailand. Khon Kaen AGR. J. 45: 1316 – 1321.
- Butnan, S., J. L. Deenik, B. Toomsan, and P. Vityakon. 2017. Biochar properties affecting carbon stability in soils contrasting in texture and mineralogy. ANRES 51:492-498.
- Butnan, S., J.L. Deenik, B. Toomsan, M.J. Antal, and P. Vityakon. 2015. Biochar characteristics and application rates affecting corn growth and properties of soils contrasting in texture and mineralogy. Geoderma 237–238: 105-116.
- Chan, K.Y., L. van Zwieten, I. Meszaros, A. Downie, and S. Joseph. 2008. Using poultry litter biochars as soil amendments. Aust. J. Soil Res. 46: 437-444.
- Chan, K.Y., L. van Zwieten, I. Meszaros, A. Downie, and S. Joseph. 2007. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment. Aust. J. Soil Res. 45: 629-634.

- Deenik, J.L., A. Diarra, G. Uehara, S. Campbell, Y. Sumiyoshi, and M.J. Antal. 2011. Charcoal ash and volatile matter effects on soil properties and plant growth in an acid Ultisol. *Soil Sci.* 176: 336-345.
- Deenik, J.L., T. McClellan, G. Uehara, M.J. Antal, and C. Sonia. 2010. Charcoal volatile matter content influences plant growth and soil nitrogen transformations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 74: 1259-1270.
- Foeroid, B., J. Lehmann, and J. Major. 2011. Modeling black carbon degradation and movement in soil. *Plant Soil* 345: 223-236.
- Glaser, B. 1999. Eigenschaften und Stabilität des Humuskorpers der Indianerschwarzerden Amazoniens. *Bayreuther Bodenkundliche Berichte* 68.
- Glaser, B., E. Balashov, L. Haumaier, G. Guggenberger, and W. Zech. 2001. The 'Terra Preta' phenomenon: A model for sustainable agriculture in the humid tropic. *Naturwissenschaften* 88: 37-41.
- Golchin, A., J.M. Oades, J.O. Skjemstad, and P. Clarke. 1994. Soil structure and carbon cycling. *Aust. J. Soil Res.* 32: 1043-1068.
- Haefele, S.M., Y. Konboon, W. Wongboon, S. Amarante, A.A. Maarifat, E.M. Pfeiffer, and C. Knoblauch. 2011. Effects and fate of biochar from rice residues in rice-based systems. *Field Crop Res.* 121: 430-440.
- Henner, P., M. Schiavon, V. Druelle, and E. Lichtfouse. 1999. Phytotoxicity of ancient gas work soils. Effect of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) on plant germination. *Org. Geochem.* 30: 963-969.
- Hossain, M.K., V. Strezov, K.Y. Chan, and P.F. Nelson. 2010. Agronomic properties of wastewater sludge biochar and bioavailability of metals in production of cherry tomato (*Lycopersicon esculentum*). *Chemosphere* 78: 1167-1171.
- Hubbell, D.H. 1971. Microbiological effects from liming soils. *Soil Crop Sci. Soc. Fla. Proc.* 31: 196-199.
- Iman, A., Z. Wahab, S.O.S. Rastan, and M.R.A. Halim. 2006. Allelopathic effect of sweet corn and vegetable soybean extracts at two growth stages on germination and seedling growth of corn and soybean varieties. *J. Agron.* 5: 62-68.
- Kamprath, E.J. 1971. Potential detrimental effects from liming highly weathered soils to neutrality. *Soil Crop Sci. Soc. Fla. Proc.* 31: 200-203.
- Karaosmanoğlu, F., A. Işığigür-Ergüdenler and A. Sever. 2000. Biochar from the straw-stalk of rapeseed plant. *Energ. Fuel.* 14: 336-339.
- Laird, D.A., P. Fleming, D.D. Davis, R. Horton, B.Q. Wang, and D.L. Karlen. 2010. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil. *Geoderma* 158: 443-449.
- Lehmann, J. 2006. Black is the new green. *Nature* 442: 624-626.
- Lehmann, J., and S. Joseph. 2009. Biochar for environmental management: An introduction. P. 1-12. In: J. Lehmann and S. Joseph. *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Earthscan, London.
- Luxmoore, R.J. 1981. Micro-, meso-, and macroporosity of soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45: 671-672.
- Lykes, V. A., C. Burns, F.A. Steinmann, and D. Kauneckis. 2015. The potential uses of biochar: A review. The College of Business, University Center for Economic Development, University of Nevada, Reno.
- Ma, N., L. Zhang, Y. Zhang, L. Yang, C. Yu, G. Yin, and X. Ma. 2016. Biochar improves soil aggregate stability and water availability in a Mollisol after three years of field application. *PLoS ONE* 11(5): e0154091. doi: 10.1371/journal.pone.0154091
- Makoto, K., D. Choi, Y. Hashidoko, and T. Koike. 2011. The growth of *Larix gmelinii* seedlings as affected by charcoal produced at two different temperatures. *Biol. Fertil. Soils.* 47: 467-472.
- Manya, J.J. 2012. Pyrolysis for biochar purposes: A review to establish current knowledge gaps and research needs. *Environ. Sci. Technol.* 46: 7939-7954.
- McLean, E.O. 1971. Potentially beneficial effects from liming: Chemical and physical. *Soil Crop Sci. Soc. Fla. Proc.* 31: 189-196.

- Mengel, K., and E.A. Kirkby. 2001. Principles of Plant Nutrition. 5th edition. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Mohan, D., C.U. Pittman, and P.H. Steele. 2006. Pyrolysis of wood/biomass for biooil: A critical review. *Energ. Fuel.* 20: 848-889.
- Mukherjee, A., A.R. Zimmerman, and W. Harris. 2011. Surface chemistry variations among a series of laboratory-produced biochars. *Geoderma* 163: 247-255.
- Mukherjee, A., and R. Lal. 2014. The biochar dilemma. *Soil Res.* 52: 217-230.
- Nzanza, B., D. Marais, and P. Soundy. 2012. Effect of arbuscular mycorrhizal fungal inoculation and biochar amendment on growth and yield of tomato. *Int. J. Agric. Biol.* 14: 965-969.
- Pastor-Villegas, J., C. Valenzuela-Calahorra, A. Bernalte-García, and V. GómezSerrano. 1993. Characterization study of char and activated carbon prepared from raw and extracted rockrose. *Carbon* 31: 1061-1069.
- Purevsuren, B., and Y. Davaajav. 2001. Thermal Analysis of Casein. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 65: 147-152.
- Rajkovich, S., A. Enders, K. Hanley, C. Hyland, A.R. Zimmerman, and J. Lehmann. 2012. Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil. *Biol. Fert. Soils.* 48: 271-284.
- Sombroek, W.G. 1966. Amazon Soils: A Reconnaissance of the Soils of the Brazilian Amazon Region. Centre for Agricultural Publications and Documentation Wageningen, Wageningen.
- Spokas, K.A., J.M. Novak, C.E. Stewart, K.B. Cantrell, M. Uchimiya, M.G. DuSaire, and K.S. Ro. 2011. Qualitative analysis of volatile organic compounds on biochar. *Chemosphere* 85: 869-882.
- Van Zwieten, L., S. Kimber, S. Morris, K. Chan, A. Downie, J. Rust, S. Joseph, and A. Cowie. 2010. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant Soil* 327: 235-246.
- Wilke, B.-M. 2005. Determination of chemical and physical soil properties. P. 47-95. In: R. Margesin and F. Schinner. *Manual of Soil Analysis: Monitoring and Assessing Soil Bioremediation.* Springer-Verlag Berlin, Heidelberg.
- Woods End Laboratories. 2011. "Biochar claims overblown" EU scientists suggest renaming to "plant charcoal". <https://woodsend.org/2011/11/biochar-claims-overblown-eu-symposium-suggests-renaming-plant-charcoal>. Accessed 29 Mar. 2015.
- Worasuwannarak, N., P. Potisri, and W. Tanthapanichakoon. 2006. Upgrading of biomass by carbonization in hot compressed water. *Songklanakarin J. Sci. Technol.* 28(5): 1049-1057.
- Yamato, M., Y. Okimori, I.F. Wibowo, S. Anshori, and M. Ogawa. 2006. Effects of the application of charred bark of *Acacia mangium* on the yield of maize, cowpea and peanut, and soil chemical properties in South Sumatra, Indonesia. *Soil Sci. Plant Nutr.* 52(4): 489-495.
- Yeboah, E., P. Ofori, G.W. Quansah, E. Dugan, and S.P. Sohi. 2009. Improving soil productivity through biochar amendments to soils. *Afr. J. Environ. Sci. Technol.* 3: 34-41.
- Zhang, W., J. Niu, V.L. Morales, X. Chen, A.G. Hay, J. Lehmann, and T.S. Steenhuis. 2010. Transport and retention of biochar particles in porous media: Effect of pH, ionic strength, and particle size. *Ecohydrology* 3: 497-508.