

ผลของถ่านชีวภาพต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีดินบางประการ ในดินร่วนปนทราย

Effect of Biochar Application on Soil Chemical Properties in Sandy Loam Soil

ศรัณย์ จันทรวงศ์¹ จักรพงษ์ ไชยวงศ์¹ สาวิกา กอนแสง² และ จีราภรณ์ อินทสาร^{1*}

Sarun Junwong¹ Chackapong Chaiwong¹ Sawika Konsaeng² and Jiraporn Inthasan^{1*}

¹ สาขาวิชาปฐพีศาสตร์ คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

¹ Program in Soil Science, Faculty of Agricultural Production, Maejo University, San Sai, Chiang Mai 50290

² สาขาวิชาเกษตรเคมี คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

² Program in Agriculture Chemistry, Faculty of Agricultural Production, Maejo University, San Sai, Chiang Mai 50290

* Corresponding author: inthasan@mju.ac.th

(Received: 11 January 2023; Revised: 7 March 2023; Accepted: 23 March 2023)

Abstract

Biochar is the agricultural waste that proceed by pyrolysis system under weathering without oxygen. This research aims to study the effect of biochar from corncob and rice husk on soil properties by incubation technique in sandy loam soil under close system at 0, 60 and 120 days after application. Split plot in completely design was created with 4 replications consisting main-plot (corncob and rice husk) and sub-plot as various rates (0 2.5 and 5.0% w/w). Corncob biochar at 5.0%w/w caused the highest soil pH and electrical conductivity at all periods of incubation. Application both of corncob and rice husk biochar at 5.0% w/w proved with the highest of organic matter. After incubation 120 days, rice husk biochar at 5.0% w/w provided the peak of cation exchange capacity (CEC) in soil sample. The available phosphorus and exchangeable potassium were increased by applying both of corncob and rice husk biochar at rate of 5.0% w/w in all stages of incubation. Moreover, all types of biochar at rates of application (2.5 and 5.0% w/w) could step-up the amounts of calcium, magnesium and sulfur exchangeable forms depending on time of incubation. Whereas addition 2.5% w/w of both corncob and rice husk biochar decreased the amounts of iron extractable and manganese. Corncob and rice husk biochar at rate 2.5 and 5.0% w/w could improve the level of extractable zinc but could not effect on extractable copper in soil sample.

Keywords: Soil amendment, plant nutrition, biochar

บทคัดย่อ

ถ่านชีวภาพ คือวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรที่ผ่านกระบวนการสลายตัวด้วยความร้อนในสภาวะไร้ออกซิเจน (pyrolysis) โดยงานวิจัยครั้งนี้ได้นำไบโอชาร์จากซังข้าวโพดและแกลบมาทำการศึกษาผลของถ่านชีวภาพต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีของดินบางประการด้วยการบ่มดินในดินร่วนปนทรายในระบบปิด ที่ระยะเวลา 0 60 และ 120 วัน วางแผนการทดลองแบบ Split Plot in Completely Randomized Design จำนวน 4 ซ้ำ ปัจจัยหลักประกอบด้วย 1) ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด 2) ถ่านชีวภาพจากแกลบ ปัจจัยรองคืออัตราของถ่านชีวภาพ 1) 0% w/w 2) 2.5% w/w และ 3) 5.0% w/w พบว่าการเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด อัตรา 5.0% w/w ทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และค่าสภาพนำไฟฟ้าในดิน (EC) มีค่าสูงสุดทุกระยะเวลาของการบ่มดิน การเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและแกลบอัตรา 5.0% w/w ทำให้มีปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินสูงสุดทุกระยะการบ่มดิน การใส่ถ่านชีวภาพจากแกลบอัตรา 5.0% w/w ทำให้มีค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดินสูงสุดที่ระยะการบ่ม 120 วัน การเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและแกลบอัตรา 5.0% w/w ส่งผลให้มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ และโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินเพิ่มขึ้นในทุกระยะการบ่มดิน ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด และแกลบทั้งสองอัตรา 2.5 และ 5.0% w/w ทำให้ปริมาณแคลเซียม แมกนีเซียม และกำมะถันที่แลกเปลี่ยนได้ในดินเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่มดิน การใช้ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด และแกลบอัตรา 2.5% w/w ส่งผลให้ปริมาณเหล็ก และแมงกานีสที่สกัดได้ในดินมีค่าลดลง การเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและแกลบทั้งสองอัตราทำให้ปริมาณสังกะสีที่สกัดได้ในดินเพิ่มขึ้นทุกระยะการบ่มดิน แต่ไม่ส่งผลต่อปริมาณทองแดงที่สกัดได้ในดิน

คำสำคัญ: วัสดุปรับปรุงดิน ธาตุอาหารพืช ถ่านชีวภาพ

คำนำ

ถ่านชีวภาพ หรือไบโอชาร์ (biochar) เป็นวัสดุปรับปรุงดิน ที่เกิดจากการนำเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาผ่านกระบวนการเปลี่ยนแปลงด้วยความร้อน ในสภาวะไร้ออกซิเจน หรือมีก๊าซออกซิเจนในปริมาณน้อย เรียกว่ากระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) ได้ผลิตภัณฑ์ส่วนหนึ่งเป็นวัสดุของแข็งสีดำ มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบสูง มีความเป็นกรด-ด่าง สภาพนำไฟฟ้าสูง (รัศถล และคณะ, 2560) และมีค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนสูงซึ่งเป็นผลมาจากความหนาแน่นของประจุต่อหน่วยพื้นผิวของสารอินทรีย์ที่สูงทำให้ดูดซับแคตไอออนได้มาก (Liang *et al.*, 2006) นอกจากนี้ยังมีพื้นที่ผิวและช่องว่างขนาดเล็กจำนวนมาก โดยขนาดของรูพรุนถ่านชีวภาพจะขึ้นอยู่กับการใช้อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผา ซึ่งเป็นแหล่งกักเก็บความชื้นหรือเพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำและความสามารถในการหมุนเวียนธาตุอาหาร รวมทั้งยังช่วยให้การระบายความชื้นเกิดได้ดีในดินอีกด้วย (Batista *et al.*, 2018) ปัจจุบันถ่านชีวภาพถูกนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับปุ๋ยอินทรีย์หรือปุ๋ยอนินทรีย์เพื่อปรับปรุงคุณภาพดินในด้านการเพิ่มประสิทธิภาพของธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์จากปุ๋ยมากขึ้น และสามารถลดปริมาณการใช้ปุ๋ยจากการชะลอหรือการชะละลายของธาตุอาหารในดิน ทำให้ปริมาณธาตุ

อาหารคงอยู่ในสภาพที่ใช้ได้นานขึ้น (Deenik *et al.*, 2011) ถ่านชีวภาพยังส่งผลต่อสิ่งมีชีวิตในดิน ในด้านการเพิ่มปริมาณและกิจกรรมของจุลินทรีย์ดินหลายชนิด เช่น แบคทีเรีย แอคติโนมัยซิตี เซื้อรา รวมทั้งเชื้อรากลุ่มอาบัสคูล่าไมคอร์ไรซาที่อาศัยร่วมกับรากพืช (Liu *et al.*, 2011) ถ่านชีวภาพสามารถช่วยกักเก็บคาร์บอนกลับลงมาสู่ดิน และลดการปลดปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ (N_2O) และก๊าซมีเทน (CH_4) ซึ่งมีบทบาทต่อการลดปัญหาโลกร้อนได้อีกส่วนหนึ่ง (Yanai *et al.*, 2007) จึงเห็นว่าถ่านชีวภาพมีศักยภาพ และคุณสมบัติที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดิน เพื่อใช้ประโยชน์ในการยกระดับค่าความเป็นกรด-ด่างของดิน และช่วยเพิ่มศักยภาพในการเคลื่อนที่ของธาตุอาหาร อีกทั้งยังเป็นตัวช่วยกักเก็บธาตุอาหารพืชบางตัวให้มีการสูญเสียที่ลดลง ซึ่งเป็นข้อดีในการนำมาปรับปรุงความอุดมสมบูรณ์ของดิน โดยเฉพาะดินเขตร้อนที่มีการชะละลายของธาตุอาหารในปริมาณสูง และมีการเสื่อมโทรมของดินได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นผลมาจากการสลายตัวของอินทรีย์วัตถุ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ปุ๋ยเคมีได้ดีขึ้น การศึกษาครั้งนี้เลือกใช้ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด และแกลบ ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ที่เหลือจากกระบวนการกะเทาะเมล็ดข้าวโพด และสีข้าวเปลือก ซังข้าวโพดส่วนหนึ่งถูกนำไปใช้ในการผลิตเอทานอล และนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล

อัดแท่ง รวมทั้งยังสามารถเป็นส่วนผสมของอาหารสัตว์ (มนตรี และวัชร, 2559; ประชา และคณะ, 2556) ส่วนแกลบที่เหลือทิ้งจากการกลั่นข้าวบางส่วนถูกนำมาใช้เป็นวัสดุปลูก เชื้อเพลิงอัดแท่ง ใช้เป็นวัสดุดูดซับ และถูกนำมาใช้เป็นส่วนประกอบของวัสดุก่อสร้าง ยังคงมีซังข้าวโพดและแกลบบางส่วนที่ไม่ได้นำไปใช้ประโยชน์ส่งผลให้เกิดกลิ่นเหม็นและเกิดปัญหาหมอกควันจากการเผาทำลาย (เสาวนีย์ และทวิวงศ์, 2564) การศึกษาประโยชน์ของถ่านชีวภาพที่ได้จากวัสดุเหลือใช้ทั้งสองชนิดต่อสมบัติทางเคมีดิน บางประการจึงเป็นแนวคิดที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในภาคการเกษตรและปรับปรุงดินต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

เก็บตัวอย่างดินร่วนปนทรายจากพื้นที่ พิกัด UTM: 47Q 504153'E 2088198'N ที่ระดับความลึก 0-30 เซนติเมตร ในพื้นที่อำเภอสนทราย จังหวัดเชียงใหม่ นำมาผึ่งให้แห้งในที่ร่ม (air-dried) และนำไปบดผ่านตะแกรงร่อนดินขนาด ขนาด 0.5 และ 2.0 มิลลิเมตร เพื่อนำตัวอย่างดินมาวิเคราะห์สมบัติดินบางประการ ก่อนและหลังการบ่มดิน โดยบ่มตัวอย่างดินที่ผ่านตะแกรงร่อน 2.0 มิลลิเมตร จำนวน 200 กรัม ร่วมกับถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด และแกลบ ที่บดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2.0 มิลลิเมตร ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสโดยใช้ความร้อน 400 องศาเซลเซียส ในการผลิต โดยการวางแผนการทดลองแบบสปลิตพล็อตผสมสมบูรณ์ (split plot in completely randomized design) จำนวน 4 ซ้ำ ประกอบด้วยปัจจัยหลัก (main plot) คือ 1. ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด 2. ถ่านชีวภาพจากแกลบ ปัจจัยรอง (sub plot) อัตราของถ่านชีวภาพ 0 เปอร์เซ็นต์ 2.5 เปอร์เซ็นต์ และ 5.0 เปอร์เซ็นต์ w/w คลุกเคล้าให้เข้ากันโดยปรับความชื้นให้อยู่ในระดับ 60 เปอร์เซ็นต์ ของความชื้นดินที่จุดอิ่มตัวด้วยน้ำ บ่มดินในระบบปิดด้วยถุงซิปล็อกขนาด 6x9 นิ้ว ที่อุณหภูมิห้อง (25-30 องศาเซลเซียส) เป็นระยะเวลา 0 60 และ 120 วัน (ปรับปรุงจาก Feng *et al.*, 2021)

การวิเคราะห์สมบัติทางฟิสิกส์ของดินก่อนการบ่มดิน นำตัวอย่างดินมาวิเคราะห์เนื้อดิน โดยวิธี Hydrometer method (Beretta *et al.*, 2014) การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของดินก่อนและหลังการบ่มดิน วิเคราะห์หาค่าความเป็นกรด-ด่างของดิน (pH) อัตราส่วน ดิน:น้ำ 1:2.5 (Wayne, 1980) ค่าสภาพนำไฟฟ้าของดิน (EC) 1:5 ดิน:น้ำ (FAO,

2008) วิเคราะห์หาปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน (OM) โดยวิธีของ Walkley and Black (1947) ปริมาณค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดินด้วย NH_4OAc pH 7.1 M โมลาร์ (FAO, 2008) วิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน ด้วยน้ำยาสกัด calcium acetate lactate (CAL) (Wünscher, 2013) วิเคราะห์หาปริมาณโพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ โดยใช้ NH_4OAc pH 7.1 โมลาร์ (Wayne, 1980) ปริมาณค่าความจุแลกเปลี่ยนได้ ด้วยสารละลาย 500 ส่วนต่อหนึ่งล้านส่วนของ P นำไปวัดค่าความขุ่นด้วยเครื่อง Spectrophotometer (Tabatabai, 1983) และปริมาณธาตุอาหารเสริมที่สกัดได้ในดิน ได้แก่ ทองแดง เหล็ก แมงกานีส และสังกะสี ด้วยน้ำยาสกัด DTPA วัดค่าด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (Wayne, 1980)

การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของถ่านชีวภาพ ก่อนการทำการทดลองโดยนำตัวอย่างถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด และแกลบ ไปบดและร่อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 2.0 มิลลิเมตร แล้ววิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่าสภาพนำไฟฟ้า ถ่านชีวภาพ:น้ำปราศจากไอออน 1:5 (Singh *et al.*, 2017) ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ (OC) โดยวิธีของ Walkley and Black (1947) ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนด้วย NH_4OAc pH 7.1 โมลาร์ (Graber *et al.*, 2017) ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ โดยใช้ Citric acid (Wang *et al.*, 2012) ปริมาณโพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมที่เป็นประโยชน์ โดยใช้กรดไฮโดรคลอริก (Camps-Arbestain *et al.*, 2017) การวิเคราะห์ปริมาณทองแดง เหล็ก แมงกานีส และสังกะสีที่ละลายได้ในน้ำ (water soluble element) อัตราส่วนถ่านชีวภาพต่อน้ำปราศจากไอออน 1:50 (ปรับปรุงจากวิธีของ Yusiharni and Gilkes, 2012)

วิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (analysis of variance) และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ย โดยวิธีการจัดกลุ่มสิ่งทดลอง Least significant difference (LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 และ 99 เปอร์เซ็นต์ ด้วยโปรแกรม Statistix 10

ผลการวิจัยและวิจารณ์

สมบัติทางเคมีของดิน และถ่านชีวภาพก่อนการทดลอง

ดินที่ใช้ในการศึกษาเป็นดินที่มีลักษณะเนื้อดินเป็นดินร่วนปนทราย (sandy loam) มีค่าความเป็นกรด-ด่าง

(pH) 6.76 ค่าสภาพนำไฟฟ้า 99.6 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ปริมาณอินทรีย์วัตถุ คือ 1.07 เปอร์เซ็นต์ ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดินเท่ากับ 4.90 เซนติโมลต่อกิโลกรัม และมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน 10.8 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ปริมาณโพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม และกำมะถันที่แลกเปลี่ยนได้ คือ 35.2 625 41 และ 17.9 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ปริมาณทองแดง เหล็ก แมงกานีส และสังกะสีที่สกัดได้ คือ 1.10 586 2.60 และ 1.40 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและแกลบ มีความเป็นกรด-ด่าง (pH) คือ 10.73 และ 7.59 ค่าความเป็นกรด-ด่างของถ่านชีวภาพจากแกลบมีค่าน้อยกว่างานวิจัยของ Singh *et al.*, (2017) เล็กน้อย ซึ่งอาจเกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสที่มีอุณหภูมิไม่เท่ากัน ถ่านชีวภาพจากงานทดลองนี้มีสมบัติเป็นด่างอ่อนจึงน่าจะเหมาะกับการใช้ปรับปรุงดินที่ความเป็นกรดปานกลางหรือดินที่เป็นกรดน้อย มีสภาพนำไฟฟ้าอยู่ 1,650 และ 493 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร มีค่าสูงกว่า ประภัศสร และคณะ (2563) ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด และแกลบมีสภาพนำไฟฟ้าอยู่ที่ 1,340 และ 270 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ 15.8 และ 10.5 เปอร์เซ็นต์ ค่าความจุ

แลกเปลี่ยนแคตไอออน 48.0 และ 45.5 เซนติโมลต่อกิโลกรัม สูงกว่าถ่านชีวภาพจากแกลบและไม้ไผ่ที่ใช้ในการศึกษาของ เสาวคนธ์ (2557) แต่มีค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนน้อยกว่างานของ สุทธวรรณ และคณะ (2563) ซึ่งเป็นถ่านชีวภาพจากมูลไก่ และเปลือกทุเรียน ขณะที่ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ 908 และ 658 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีค่าสูงกว่าถ่านชีวภาพจากเปลือกทุเรียน และเปลือกกล้วย ซึ่งมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์อยู่เพียง 14.42 และ 8.62 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (สายจิต และโสธรญา, 2558) ปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ 3,938 และ 1,397 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ปริมาณแคลเซียมที่เป็นประโยชน์ 1,800 และ 1,196 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และแมกนีเซียมที่เป็นประโยชน์ คือ 707 และ 749 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ปริมาณทองแดง เหล็ก แมงกานีส และสังกะสีที่ละลายได้ในน้ำ คือ 12.4 0.8 และ 42.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด ส่วนถ่านชีวภาพจากแกลบ คือ 8.3 23.1 และ 17.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (Table 1) ซึ่งถ่านชีวภาพจะมีสมบัติทางเคมีที่แตกต่างกันตามชนิดของวัสดุ และอุณหภูมิในการผลิต

Table 1 Chemical properties of biochar materials before incubation experiment

Property	Corn cob biochar	Rice husk biochar
pH _(1:5)	10.73	7.59
EC _(1:5) (μS cm ⁻¹)	1,650	493
OC (%)	6.1	4.1
OM (%)	10.6	7.0
CEC (cmol kg ⁻¹)	48.0	45.5
Avail. P (mg kg ⁻¹)	908	658
Avail. K (mg kg ⁻¹)	3,938	1,397
Avail. Ca (mg kg ⁻¹)	1,800	1,196
Avail. Mg (mg kg ⁻¹)	707	749
WS. Cu (mg kg ⁻¹)	ND	ND
WS. Fe (mg kg ⁻¹)	12.4	8.3
WS. Mn (mg kg ⁻¹)	0.8	23.1
WS. Zn (mg kg ⁻¹)	42.1	17.3

Remarks: Avail = Available; WS = Water Soluble element; ND = Not detected

สมบัติทางเคมีบางประการของดิน หลังการบ่มดิน

การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีดินบางประการในการใช้ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด และแกลบที่บ่มร่วมกับดินร่วนปนทราย เป็นระยะเวลา 0 60 และ 120 วัน พบว่าการใช้ถ่านชีวภาพทั้งสองชนิดทุกอัตราทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของดินเพิ่มขึ้นจากค่าควบคุมทุกระยะการบ่มดิน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jabin and Rani (2020) พบว่าถ่านชีวภาพจากแกลบและใบมะพร้าว ทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของดินลูกรังและดินทรายเพิ่มสูงขึ้นทุกระยะการบ่มดิน เป็นไปได้ว่าตัวของถ่านชีวภาพนั้นมีค่าความเป็นกรด-ด่างที่สูง (Table 1) จึงช่วยยกระดับค่าความเป็นกรด-ด่างของดินให้เพิ่มสูงขึ้น ส่วนสภาพนำไฟฟ้าในดินที่ระยะเวลากการบ่มดิน 0 วัน การเติมถ่านชีวภาพทุกตำรับทดลองทำให้ค่าสภาพนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากการไม่ใส่ถ่านชีวภาพ ส่วนระยะการบ่มดิน 60 วัน พบว่าการใช้ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดทุกอัตรา ทำให้สภาพนำไฟฟ้าในดินเพิ่มขึ้นจากค่าควบคุม การเพิ่มขึ้นของสภาพนำไฟฟ้าในดินเกิดจากปริมาณองค์ประกอบของกลุ่มเกลือที่สะสมอยู่ในชนิดพืชที่แตกต่างกัน เช่น ถ่านชีวภาพจากหญ้าสวิตช์กราสและใบและซังข้าวโพดที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสในอุณหภูมิเดียวกันมีปริมาณสารประกอบอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนและปริมาณเถ้าสูงกว่าถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้ (Brewer *et al.*, 2011) เมื่อมีการเติมถ่านชีวภาพในอัตราที่สูงขึ้นจึงทำให้ปริมาณองค์ประกอบของเกลือที่ละลายน้ำได้ในดินเพิ่มสูงขึ้น (Downie *et al.*, 2009) สอดคล้องกับ Shah *et al.* (2017) การเติมถ่านชีวภาพในอัตรา 0 5 10 และ 20 ตันต่อเฮกตาร์ ที่ระยะการบ่ม 0 5 10 และ 50 วัน ทำให้สภาพนำไฟฟ้าของดินเพิ่มขึ้น

จากตำรับที่ไม่มีการเติมถ่านชีวภาพ และ Ngalani *et al.* (2022) ที่บ่มดินร่วมกับถ่านชีวภาพจากกะลากาแฟ และฝักผลโกโก้ ที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 350 และ 550 องศาเซลเซียส ในอัตรา 0 20 40 และ 80 กรัมต่อกิโลกรัม ที่ระยะเวลาบ่มดิน 7 14 30 45 และ 60 วัน พบว่าการเติมถ่านชีวภาพทั้งสองชนิดส่งผลให้สภาพนำไฟฟ้าในดินมีค่าเพิ่มขึ้นจากการไม่ใส่ถ่านชีวภาพทุกช่วงการบ่มดิน นอกจากนี้ Vidana- Gamage *et al.* (2016) รายงานว่าการเติมถ่านชีวภาพจากแกลบในดิน Non-Calcic Brown และ Reddish Brown Earth ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นอาจส่งผลให้สภาพนำไฟฟ้าของดินลดลง ขณะที่การบ่มดิน 120 วัน (Table 4) ไม่มีความแตกต่างทางสถิติระหว่างตำรับทดลองของสภาพนำไฟฟ้า ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน การบ่มดินที่ระยะ 0 วัน การใช้ถ่านชีวภาพจากแกลบอัตรา 2.5 เปอร์เซ็นต์ w/w และที่ระยะการบ่มดิน 120 วัน มีปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินที่ต่ำกว่าการไม่ใส่ถ่านชีวภาพ ซึ่งอาจเกิดจากการนำคาร์บอนไปใช้ในการทำกิจกรรมของสิ่งมีชีวิตในดิน หรืออาจจะความผิดพลาดในการสุ่มตัวอย่างดินที่มีการคลุกเคล้าไม่สม่ำเสมอหลังจากการบ่มมาวิเคราะห์จึงทำให้ปริมาณอินทรีย์วัตถุที่วิเคราะห์ได้มีค่าต่ำกว่าดินก่อนการบ่มเล็กน้อย แต่การใช้ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด และแกลบ อัตรา 5.0 เปอร์เซ็นต์ w/w ทำให้ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินสูงสุด สอดคล้องกับ Mohan *et al.* (2018) ที่บ่มดินร่วมกับถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด และแกลบ อัตรา 0.5 1.5 และ 3.0 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลา 107 วัน ส่งผลให้ดินมีปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินเพิ่มขึ้นตามปริมาณของถ่านชีวภาพ

Table 2 Effect of biochar on some soil chemical properties with incubation 0 day

Treatment	pH _(1:2.5)	EC _(1:5) ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	OM (%)	CEC (cmol kg^{-1})	P	K	Ca	Mg	S
					mg kg ⁻¹				
Main plot									
CCB	7.16a	180a	1.69a	5.88b	19.1	258a	475b	36	12.2
RHB	6.82b	126b	1.58b	6.53a	18.2	134b	502a	36	13.0
F-test	*	**	*	**	NS	**	**	NS	NS

Table 2 Effect of biochar on some soil chemical properties with incubation 0 day (Cont.)

Treatment	pH _(1:2.5)	EC _(1:5) (μS cm ⁻¹)	OM (%)	CEC (cmol kg ⁻¹)	P	K	Ca	Mg	S
					-----mg kg ⁻¹ -----				
Sub plot									
0% (w/w)	6.68c	115c	1.53b	5.62c	10.7c	31c	411c	34b	10.5b
2.5% (w/w)	7.03b	155b	1.59b	6.28b	16.9b	226c	491b	37a	13.9a
5.0% (w/w)	7.28a	189a	1.78a	6.72a	28.3a	332a	564a	38a	13.5a
F-test	**	**	**	**	**	**	**	*	**
Main×Sub									
CCB 0%	6.68d	115d	1.53	5.62d	10.8	31e	411e	34	10.5
CCB 2.5%	7.20b	185b	1.68	5.86cd	17.3	320b	466d	37	11.9
CCB 5.0%	7.62a	239a	1.86	6.15c	29.3	423a	548b	38	14.3
RHB 0%	6.68d	115d	1.53	5.62d	10.8	31e	411e	34	10.5
RHB 2.5%	6.87cd	124cd	1.50	6.69b	16.5	132d	516c	37	13.5
RHB 5.0%	6.93bc	139c	1.71	7.28a	27.3	240c	580a	37	15.0
Grand Mean	6.99	152	1.63	6.20	18.62	196	489	36.2	12.6
F-test	**	**	NS	**	NS	**	*	NS	NS
CV (%)	1.17	6.18	5.31	3.90	12.29	11.96	3.39	5.16	11.94

Remarks: CCB = corncob biochar; RHB = rice husk biochar; NS Not significant

Mean in the same column followed by different letters were significantly different by LSD test at

* $P \leq 0.05$, ** $P \leq 0.01$

ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดิน การใช้ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและแกลบทุกอัตราส่วนทำให้ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดินเพิ่มขึ้นทุกการบ่มดิน การเพิ่มขึ้นค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดินเกิดจากสมบัติของถ่านชีวภาพที่มีพื้นที่ผิวสูง และมีความหนาแน่นของประจุลบในบริเวณพื้นที่ผิวสูง (Amonette and Joseph, 2009) ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับธาตุอาหาร การแลกเปลี่ยนประจุบวกและประจุลบในดินได้สูง (Cheng *et al.*, 2008) ทำให้เมื่อเติมถ่านชีวภาพลงไปในดินจึงสามารถเพิ่มค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดินให้สูงได้ ซึ่งสอดคล้องกับ Chintala *et al.* (2014) ที่ใช้ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและหญ้าสวิตซ์ อัตรา 52 104 และ 156 เมกะกรัมต่อเฮกตาร์ บ่มร่วมกับดินกรด เมื่อบ่มครบ 165 วัน ทำให้ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดินเพิ่มขึ้นจากค่าควบคุม ซึ่งการใช้ถ่านชีวภาพในปริมาณที่สูงจะส่งผลทำให้ปริมาณความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดินสูงตามไปด้วย ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน มีค่าผันแปรไปตามปริมาณของถ่านชีวภาพ

ทั้งสองชนิด โดยพบว่าปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินมีค่าเพิ่มขึ้นจากค่าควบคุมทุกการบ่มดิน สอดคล้องกับงานของ Addisu and Seyoum (2021) พบว่าดินที่ผ่านการบ่มด้วยถ่านชีวภาพที่ได้จากเปลือกกาแฟ อัตรา 10 และ 20 ตันต่อเฮกตาร์ ทำให้มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินสูงขึ้นจากค่าควบคุมจาก 7.48 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เป็น 9.48 และ 13.56 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ จากการใช้ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและแกลบมีผลทำให้ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน มีค่าเพิ่มขึ้นจากค่าควบคุมในทุกระยะการบ่มดินอย่างชัดเจน เช่นเดียวกับงานทดลองของ Inal *et al.* (2015) ที่บ่มดินร่วมกับถ่านชีวภาพจากมูลไก่ เป็นระยะเวลา 70 วัน มีปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมีค่าสูงขึ้นตามอัตราการใช้ถ่านชีวภาพ และใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Zhang *et al.* (2019) ที่รายงานว่าหลังจากการบ่มถ่านชีวภาพร่วมกับดิน ที่ระยะ 140 วัน ส่งผลทำให้ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมีค่าเพิ่มขึ้นจากดินที่ไม่มีการเติมถ่านชีวภาพ

Table 3 Effect of biochar on some Soil chemical properties with incubation 60 days

Treatment	pH _(1:2.5)	EC _(1:5) (μS cm ⁻¹)	OM (%)	CEC (cmol kg ⁻¹)	P	K	Ca	Mg	S
					-----mg kg ⁻¹ -----				
Main plot									
CCB	7.32a	215a	1.63	5.47	24.0	299a	552	35b	18.9b
RHB	6.58b	178b	1.58	5.46	24.0	137b	555	38a	23.1a
F-test	**	**	NS	NS	NS	**	NS	*	*
Sub plot									
0 % (w/w)	5.87c	189b	1.45b	5.29	13.5c	33c	498b	34b	16.6b
2.5% (w/w)	7.28b	182b	1.55b	5.51	23.0b	271b	561a	37a	23.1a
5.0% (w/w)	7.70a	218a	1.80a	5.59	35.5a	350a	601a	39a	23.4a
F-test	**	**	**	NS	**	**	**	**	**
Main×Sub									
CCB 0%	5.87d	189bc	1.45	5.29	13.5c	33e	498	34	16.6c
CCB 2.5%	7.69b	199b	1.58	5.29	22.5b	396b	568	36	19.9b
CCB 5.0%	8.40a	257a	1.84	5.83	36.0a	467a	590	36	20.3b
RHB 0%	5.87d	189b	1.45	5.29	13.5c	33e	498	34	16.6c
RHB 2.5%	6.88c	165c	1.52	5.73	23.5b	146d	554	39	25.8a
RHB 5.0%	6.99c	179c	1.76	5.34	35.0a	233c	613	41	26.8a
Grand Mean	6.95	196	1.60	5.46	24.0	218	553	36.5	21.0
F-test	**	**	NS	NS	NS	**	NS	NS	*
CV (%)	1.34	9.04	6.15	5.84	5.29	4.32	6.63	5.92	10.82

Remarks: CCB = corncob biochar, RHB = rice husk biochar; NS = Not significant

Mean in the same column followed by different letters were significantly different by LSD test at

* $P \leq 0.05$, ** $P \leq 0.01$

ปริมาณธาตุอาหารรองในดินที่ผ่านการบ่มในระยะ
เวลาต่าง ๆ พบว่าการใช้ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและ
แกลบทุกอัตราทำให้ปริมาณธาตุอาหารรองที่แลกเปลี่ยน
ได้ในดินนั้นสูงกว่าการไม่ใส่ถ่านชีวภาพ ในทุกช่วงเวลาของ
การบ่มดิน ซึ่งสอดคล้องกับงานทดลองของ Dume *et al.*
(2017) ที่ทำการบ่มดินร่วมกับถ่านชีวภาพจากเปลือกกาแฟ
และซังข้าวโพดที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิส 350 และ 500
องศาเซลเซียส ในอัตราที่แตกต่างกัน พบว่าตัวรับที่ใช้
ถ่านชีวภาพส่งผลทำให้ปริมาณแคลเซียม และแมกนีเซียม
ที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมีค่าเพิ่มขึ้นจากตัวรับที่ไม่เติมถ่าน
ชีวภาพ ในงานทดลองเรื่องนี้พบว่าปริมาณแมกนีเซียม

ที่แลกเปลี่ยนได้สูงขึ้นเมื่อมีการเติมถ่านชีวภาพที่ได้จาก
ซังข้าวโพด และแกลบแต่ไม่มีความแตกต่างในทางสถิติกับ
การไม่ใส่ถ่านชีวภาพ โดยอัตราที่ทำให้ปริมาณแมกนีเซียม
ที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน คือ อัตรา 5.0 เปอร์เซ็นต์ w/w
ทั้งในระยะการบ่มดินที่ 60 และ 120 วัน ตามลำดับ ขณะที่
ปริมาณกำมะถันที่แลกเปลี่ยนได้ในดินจะเพิ่มขึ้นตาม
ระยะเวลาของการบ่มโดยพบว่าอัตรา 5.0 เปอร์เซ็นต์ w/w
มีผลทำให้ปริมาณกำมะถันสูงกว่าอัตรา 2.5 เปอร์เซ็นต์ w/w
และการใช้ถ่านชีวภาพจากแกลบมีแนวโน้มต่อการเพิ่มของ
ปริมาณกำมะถันที่แลกเปลี่ยนได้สูงกว่าถ่านชีวภาพที่ได้จาก
ซังข้าวโพด (Table 2 Table 3 และ Table 4)

Table 4 Effect of Biochar on some Soil chemical properties with Incubation 120 days

Treatment	pH _(1:2.5)	EC _(1:5) ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	OM (%)	CEC (cmol kg^{-1})	P	K	Ca	Mg	S
					-----mg kg ⁻¹ -----				
Main plot									
CCB	6.75a	294	1.62	6.17b	22.5	314a	545	37	21.8b
RHB	6.09b	284	1.71	6.50a	21.2	149b	551	38	23.8a
F-test	**	NS	NS	*	NS	**	NS	NS	*
Sub plot									
0% (w/w)	5.52c	285	1.48b	5.76c	10.5c	32c	507c	34c	18.7b
2.5% (w/w)	6.51b	282	1.52b	6.18b	19.1b	287b	552b	38b	26.0a
5.0% (w/w)	7.23a	300	1.98a	7.06a	35.9a	375a	586a	41a	23.8a
F-test	**	NS	**	**	**	**	**	**	**
MainxSub									
CCB 0%	5.52c	285	1.48	5.76d	10.5	32e	507	34	18.7b
CCB 2.5%	6.70b	285	1.43	6.01cd	19.5	427b	550	37	19.3b
CCB 5.0%	8.03a	312	1.95	6.74b	37.5	483a	578	40	27.4a
RHB 0%	5.52c	285	1.48	5.76d	10.5	32e	507	34	18.7b
RHB 2.5%	6.33b	279	1.62	6.35bc	18.7	148d	553	39	24.5a
RHB 5.0%	6.42b	289	2.01	7.38a	34.3	268c	595	43	28.2a
Grand Mean	6.42	289	1.66	6.33	21.8	231	548	37.9	22.8
F-test	**	NS	NS	**	NS	**	NS	NS	**
CV (%)	1.99	11.19	9.42	1.99	7.50	5.46	2.20	4.33	11.44

Remarks: CCB = corncob biochar; RHB = rice husk biochar; NS = Not significant

Mean in the same column followed by different letters were significantly different by LSD test at

* $P \leq 0.05$, ** $P \leq 0.01$

ปริมาณธาตุอาหารเสริมหลังการบ่มดิน พบว่าการใช้ ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและแกลบ อัตรา 5.0 เปอร์เซ็นต์ w/w ส่งผลให้ปริมาณเหล็กที่สกัดได้ในดินมีน้อยกว่าการ ไม่ใส่ถ่านชีวภาพหลังการบ่มดิน 60 และ 120 วัน ซึ่ง Dume *et al.* (2016) รายงานว่าจากการใช้ถ่านชีวภาพจากเปลือก กาแฟ และซังข้าวโพดในอัตรา 0 5 10 และ 15 ตันต่อ เฮกตาร์ ทำให้ปริมาณเหล็กที่สกัดได้ในดินมีค่าลดลง หลังจากบ่มดินที่ระยะเวลา 3 เดือน และการใช้ถ่านชีวภาพ จากซังข้าวโพด และแกลบ อัตรา 5.0 เปอร์เซ็นต์ w/w ทำให้ปริมาณแมงกานีสที่สกัดได้ในดิน มีค่าสูงสุดที่ระยะ การบ่มดิน 120 วัน ซึ่งมาจากองค์ประกอบของถ่านชีวภาพเอง

ที่มีปริมาณแมงกานีสสูง คือ 23.1 กรัมต่อกิโลกรัม ส่วน งานวิจัยของ Abujabhah *et al.* (2016) บ่มถ่านชีวภาพ ร่วมกับดินร่วนเหนียว ดินร่วน และดินร่วนปนทราย ในอัตรา 0 2.5 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์ w/w การใช้ถ่านชีวภาพ ทำให้ปริมาณแมงกานีสที่สกัดได้ในดินทั้งสามชนิดมีค่า ลดลงจากค่าควบคุม หลังบ่มร่วมกับดินนาน 10 เดือน ซึ่ง Hailegnaw *et al.* (2020) ใช้ถ่านชีวภาพอัตรา 0.5 2 5 และ 8 เปอร์เซ็นต์ w/w บ่มกับดินเนื้อร่วน และ ร่วนเหนียว พบว่าดินที่มี ค่า pH < 6.00 การใช้ถ่านชีวภาพ ทุกอัตราส่งผลให้ปริมาณแมงกานีสที่สกัดได้ในดินลดลง ปริมาณสังกะสีที่สกัดได้ในดินเพิ่มขึ้นจากการใช้ถ่านชีวภาพ

ทั้ง 2 ชนิด และ 2 อัตรา โดยปริมาณสังกะสีที่สกัดได้มีค่าสูงสุดตลอดระยะการบ่มดินตามปริมาณของสังกะสีที่วิเคราะห์ได้ (Figure 1) สอดคล้องกับงานทดลองของ Hass *et al.* (2012) การเติมถ่านชีวภาพจากมูลไก่ที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิส 350 และ 700 องศาเซลเซียส ในอัตราที่แตกต่างกันบ่มร่วมกับดินนาน 8 สัปดาห์ ทำให้ปริมาณสังกะสีที่สกัดได้ในดินเพิ่มขึ้น ส่วนการใช้ถ่านชีวภาพจากขี้ข้าวโพด และแกลบในอัตรา 2.5 และ 5.0 เปอร์เซ็นต์

w/w ทำให้ปริมาณทองแดงที่สกัดได้ในดินต่ำกว่าค่ารับควบคุมตลอดระยะการบ่มดิน ซึ่งสอดคล้องกับ Tsai and Chang (2019) พบว่าการบ่มถ่านชีวภาพร่วมกับดินร่วนเหนียวที่ปฏิกิริยาดินเป็นกรดเล็กน้อยถึงด่างเล็กน้อย ทำให้ปริมาณทองแดงที่สกัดได้ในดินมีค่าลดลง แต่ในดินเหนียวที่เป็นกรดเล็กน้อยการใช้ถ่านชีวภาพทำให้ดินหลังการบ่มมีปริมาณทองแดงที่สกัดได้สูงกว่าค่ารับควบคุม ซึ่งความแตกต่างนี้อาจมีผลมาจากลักษณะของเนื้อดินที่ใช้ในการศึกษา

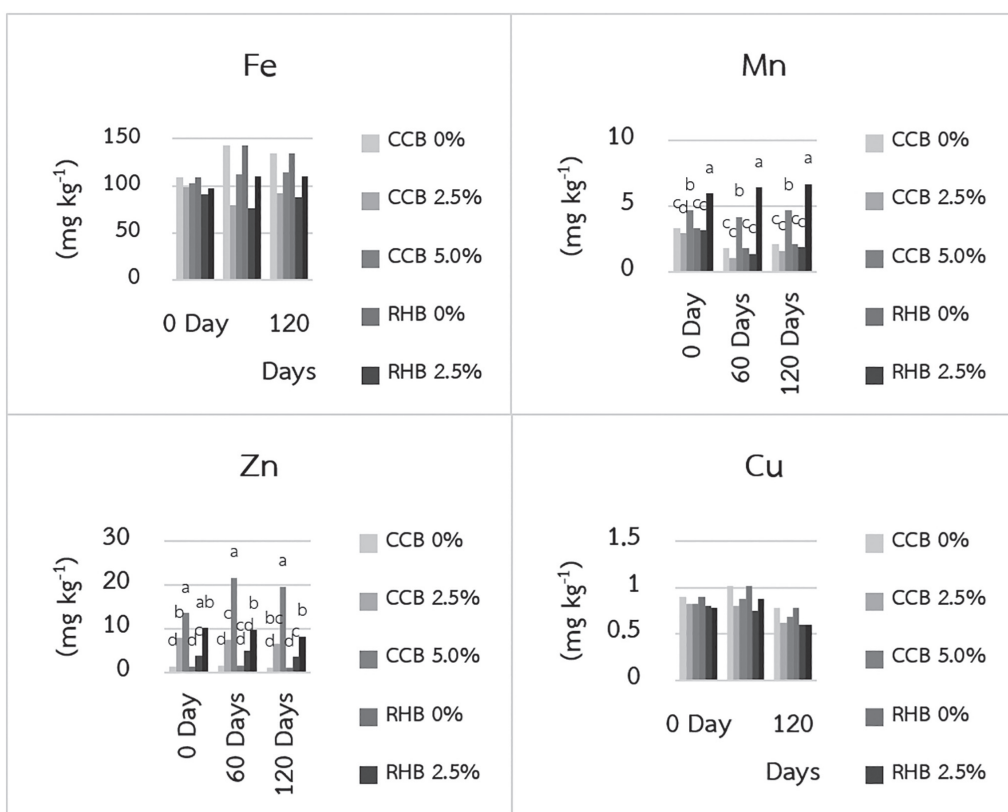


Figure 1 Effect of biochar on micro elements in soil after incubation

สรุปผลการวิจัย

การใช้ถ่านชีวภาพจากขี้ข้าวโพด มีแนวโน้มทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างในดิน และสภาพน้ำไฟฟ้าในดินเพิ่มมากที่สุด การใช้ถ่านชีวภาพจากขี้ข้าวโพดและแกลบอัตรา 5.0 เปอร์เซ็นต์ w/w ส่งผลให้ปริมาณอินทรีย์วัตถุมีค่าสูงสุดทุกระยะการบ่มดิน การใช้ถ่านชีวภาพจากแกลบในอัตรา 5.0 เปอร์เซ็นต์ w/w ทำให้ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดินมีค่าสูงสุด ที่ระยะการบ่ม 120 วัน

การใส่ถ่านชีวภาพจากขี้ข้าวโพดและแกลบทั้งสองอัตราทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ และปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้มีค่าเพิ่มขึ้น การใช้ถ่านชีวภาพจากแกลบ อัตรา 5.0 เปอร์เซ็นต์ w/w ทำให้ปริมาณแคลเซียม แมกนีเซียม และกำมะถันที่แลกเปลี่ยนได้ในดินสูงที่สุดในระยะการบ่มดิน 60 และ 120 วัน การใช้ถ่านชีวภาพจากขี้ข้าวโพด และแกลบอัตรา 2.5 เปอร์เซ็นต์ w/w ทำให้มีปริมาณเหล็ก และแมงกานีสที่สกัดได้ในดินลดลง

เมื่อเทียบกับการไม่ใส่ถ่านชีวภาพ ซึ่งการใช้ถ่านชีวภาพจาก ชังข้าวโพด และแกลบทั้งสองอัตราทำให้ปริมาณสังกะสี ที่สกัดได้ในดินสูงกว่าการไม่ใส่ถ่านชีวภาพ การนำไปใช้ ประโยชน์ในอนาคตควรทำงานวิจัยในสภาพไร่นาเพื่อ ตอบสนองต่อการเจริญของพืช โดยอัตราของถ่านชีวภาพ ทั้ง 2 ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 7.5-15 ตันต่อไร่

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยแม่โจ้ “ทุนศิษย์ก้นกุฏิ” ประจำปีการศึกษา พ.ศ. 2563 และสาขาปฐพีศาสตร์ คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่อนุเคราะห์อุปกรณ์ เครื่องมือและห้องปฏิบัติการในงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

ประชา ตรีอินทอง นรุณ วารมิตร์ สราวุธ รุ่งเมฆารัตน์ จุฑามาต ร่มแก้ว และปิยะ กิตติภาดากุล. 2556. องค์ประกอบทางเคมี และผลิตชีวมวลของตอ ชังข้าวโพดที่ได้รับอิทธิพลจากระยะการเก็บเกี่ยว และความหนาแน่นต้น. การประชุมวิชาการแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 10, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 6-7 ธันวาคม. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, จังหวัดนครปฐม. น. 165-178.

ประภัสสร รัตนไพฑูรณ์ นิกราน หอมดวง ญัฐวุฒิ ดุษฎี ภคมน ปิตานา และชูรัตน์ ธารารักษ์. 2563. การ วิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านชีวภาพจากแกลบและ ชังข้าวโพดเพื่อปรับปรุงดิน. วารสารวิชาการพลังงาน ทดแทนสู่ชุมชน 3(3): 74-79.

มนตรี ปัญญาทอง และวัชร แลน้อย. 2559. การใช้ ชังข้าวโพดหมักทดแทนอาหารผสมสำเร็จรูปในไก่ ลูกผสมพื้นเมือง. วารสารเกษตร. 32(1): 111-117.

รัตชล อ่างมณี กัญจน์นรี ช่วงฉ่ำ และอรอนพ หอมจันทร์. 2560. สมบัติของไบโอชาร์ที่ผลิตจากเศษข้าวโพด และศักยภาพในการใช้วัสดุปรับปรุงดิน. วารสารวิจัย และพัฒนา วไลยอลงกรณ์ในพระบรมราชูปถัมภ์ 12(1): 53-63.

สายจิต ดาวสุโข และโสธรา รอดประเสริฐ. 2558. การพัฒนาคุณภาพดินโดยใช้ถ่านชีวภาพที่ผลิตจาก

วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร. วารสารวิทยาศาสตร์ ประยุกต์ 4(4): 95-102.

สุทธวรรณ วชิรณูสร อรประภา เทพศิลป์วิสุทธิ์ พักตร์เพ็ญ ภูมิพันธ์ และสมชาติ ชคตะการ. 2563. ผลของปุ๋ย มูลไก่และถ่านชีวภาพต่อสมบัติทางเคมีของดินและ การเจริญเติบโตของผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊คที่ปลูก ในสภาพดินกรด. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 28(2): 343-355.

เสาวคนธ์ เหมวงษ์. 2557. ผลของถ่านชีวภาพจากไม้ไผ่ และแกลบต่อผลผลิตและประสิทธิภาพการดูดใช้ ไนโตรเจนของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1. วารสารวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี 16(1): 69-75.

เสาวนีย์ วิจิตรกุสม และทวีวงศ์ ศรีบุรี. 2564. ถ่านชีวภาพ และการประยุกต์ใช้เพื่อเกษตรกรรมอย่างยั่งยืน. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

Abujabbar, I.S., R. Doyle, S.A. Bound and J.P. Bowman. 2016. The effect of biochar loading rates on soil fertility, soil biomass, potential nitrification, and soil community metabolic profiles in three different soils. Journal of soils and sediments 16: 2211-2222.

Addisu, A.S. and E.G. Seyoum. 2021. Effect of incubation study of coffee husk on the amendment of chemical properties on acid soil. International Journal of Research Studies in Agricultural Sciences 7(7): 35-41. Available: DOI:<http://dx.doi.org/10.20431/2454-6224.0707004>.

Amonette, J and S. Joseph. 2009. Characteristics of biochar: micro-chemical properties. pp. 35-45. In: J. Lehmann and S. Joseph (eds). Biochar for Environmental Management: Science and Technology. Earthscan, United Kingdom.

Batista, E.M.C.C., J. Shultz, T.T.S. Matos, M.R. Fornari, T.M. Ferreira, B. Szpoganicz, R.A. Freitas and A.S. Mangrich. 2018. Effect of surface and porosity of biochar on water holding capacity aiming indirectly at

- preservation of the Amazon biome. *Scientific Reports* 8(1): 10677.
- Beretta, A.N., A.V. Silbermann, L. Paladino, D. Torres, D. Bassahun, R. Musselli and A. Garcia-Lamohte. 2014. Soil texture analyses using a hydrometer: modification of the Bouyoucos method. *Ciencia e investigación agraria: revista latinoamericana de ciencias de la agricultura* 41(2): 263-271.
- Brewer, C.E., R. Unger, K. Schmidt-Rohr and R.C. Brown. 2011. Criteria to select biochars for field studies based on biochar chemical properties. *Bioenergy Research* 4: 312-323.
- Camps-Arbestain, M., Q. Shen, T. Wang, L.V. Zwieten and J. Novak. 2017. Available nutrients in biochar. pp. 109-125. *In*: B. Singh, M. Camps-Arbestain and J. Lehmann (eds.). *Biochar: a guide to analytical methods*. Csiro publishing, Australia.
- Cheng, C.H., J. Lehmann and M.H. Engelhard. 2008. Natural oxidation of black carbon in soils: Changes in molecular form and surface charge along a climosequence. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 72(6): 1598-1610.
- Chintala, R., J. Mollinedo, T.E. Schumacher, D.D. Malo and J.L. Julson. 2014. Effect of biochar on chemical properties of acidic soil. *Arch. Agron Soil Sci.* 60(3): 393-404. Available: <https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.01.010>.
- Deenik, J.L., A. Diarra, G. Uehara, S. Campbell, Y. Sumiyoshi and M.J. Antal Jr. 2011. Charcoal ash and volatile matter effects on soil properties and plant growth in an acid Ultisol. *Soil Science* 176(3): 336-345. Available: DOI:10.1097/SS.0b013e31821fbfea.
- Downie, A., A. Croky and P. Munroe. 2009. Physical properties of biochar. pp 13-34. *In*: J. Lehmann and S. Joseph (eds). *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Earthscan, United Kingdom.
- Dume, B., D. Ayele, A. Regassa and G. Barecha. 2016. Interactive effects of biochar in soil related to feedstock and pyrolysis temperature. *American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Sciences* 16(3): 442-448. Available: DOI:10.5829/idosi. aejaes.2016.16.3.12880.
- Dume, B., D. Ayele, A. Regassa and G. Berecha. 2017. Improving available phosphorus in acidic soil using biochar. *Journal of Soil Science and Environmental Management* 8(4): 87-94. Available: <https://doi.org/10.5897/JSEEM2015.0540>.
- Feng, H., J. Guo, S. Malghani, M. Han, P. Cao, J. Sun, X. Xu, X. Xu and W. Wang. 2021. Effect of soil moisture and temperature on microbial regulation of methane fluxes in a poplar plantation. *Forests* 12(4): 407. Available: <https://doi.org/10.3390/f12040407>.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2008. *FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Graber, E.R., B. Singh, K. Hanley and J. Lehmann. 2017. Determination of cation exchange capacity in biochar. pp. 74-84. *In*: B. Singh, M. Camps-Arbestain and J. Lehmann (eds.). *Biochar: a guide to analytical methods*. Csiro publishing, Australia.
- Hailegnaw, N.S., F. Mercl, K. Pračke, L. Praus, J. Száková and P. Tlustoš. 2020. The Role of Biochar and Soil Properties in Determining the Available Content of Al, Cu, Zn, Mn, and Cd in Soil. *Agronomy* 10(6): 885. Available: <https://doi.org/10.3390/agronomy10060885>.
- Hass, A., J.M. Gonzalez, I.M. Lima, H.W. Godwin, J.J. Halvorson and D.G. Boyer. 2012. Chicken manure biochar as liming and nutrient source for acid appalachian soil. *Journal of Environmental Quality* 41(4): 1096-1106.

- Available: <https://doi.org/10.2134/jeq2011.0124>.
- Inal, A., A. Gunes, O. Sahin, M.B. Taskin and E.C. Kaya. 2015. Impacts of biochar and processed poultry manure, applied to a calcareous soil, on the growth of bean and maize. *Soil use and Management* 31(1): 106-113. Available: <https://doi.org/10.1111/sum.12162>.
- Jabin, P.P.N. and B. Rani. 2020. Effect of biochar and farmyard manure on soil chemical properties at different periods of incubation. *Journal of Soils and Crops* 30(2): 213-220.
- Liang, B., J. Lehmann, D. Solomon, J. Kinyangi, J. Grossman, B.O. Nell, J.O. Skjemstad, J. Thies, F.J. Luizao, J. Petersen and E.G. Neves. 2006. Black Carbon Increases Cation Exchange Capacity in soils. *Soil science society of America journal* 70(5): 1719-1730. Available: <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0383>.
- Liu, Y., M. Yang, Y. Wu, H. Wang, Y. Chen and W. Yu. 2011. Reducing CH₄ and CO₂ emissions from waterlogged paddy soil with biochar. *Journal of Soils and Sediments* 11: 930-939.
- Mohan, D., K. Abhishek, A. Sarswat, M. Patel, P. Singh and C.U. Pittman Jr. 2018. Biochar production and applications in soil fertility and carbon sequestration—a sustainable solution to crop-residue burning in India. *RSC advances* 8(1): 508-520. Available: DOI:10.1039/C7RA10353K.
- Ngalani, G.P., F.D. Kagho, N.N.C. Peguy, P. Prudent, J.A. Ondo and E. Ngameni. 2022. Effects of coffee husk and cocoa pods biochar on the chemical properties of an acid soil from West Cameroon. *Archives of Agronomy and Soil Science* 69(5): 744-758. Available: <https://doi.org/10.1080/03650340.2022.2033733>.
- Shah, T., S. Khan and Z. Shah. 2017. Soil respiration, pH and EC as influenced by biochar. *Soil and Environment* 36(1): 77-83. Available: DOI: 10.25252/SE/17/51184.
- Singh, B., M.M. Dolk, Q. Shen and M. Camps-Arbestain. 2017. Biochar pH, electrical conductivity and liming potential. pp. 23-38. *In: B. Singh, M. Camps-Arbestain and J. Lehmann (eds.). Biochar: a guide to analytical methods. Csiro publishing, Australia.*
- Tabatabai, M.A. 1983. Sulfur. pp. 501-538. *In: A.L. Page (eds.). Methods of soil analysis part 2. America Society of Agronomy Monograph. No. 9. Madison, Wisconsin. USA.*
- Tsai, C.C and Y.F. Chang. 2019. Carbon dynamics and fertility in biochar-amended soils with excessive compost application. *Agronomy* 9(9): 511. Available: <https://doi.org/10.3390/agronomy9090511>.
- Vidana-Gamage, D.N., R.B. Mapa, R.S. Dharmakeerthi and A. Biswas. 2016. Effect of rice-husk biochar on selected soil properties in tropical Alfisols. *Soil Research* 54(3): 302-310. Available: <https://doi.org/10.1071/SR15102>.
- Walkley, A and I.A. Black. 1947. Chromic acid titration method for determination of soil organic matter. *Soil Science Society of America Journal* 63: 257.
- Wang, T., M. Camps-Arbestain, M. Hedley and P. Bishop. 2012. Predicting phosphorus bioavailability from high-ash biochars. *Plant and soil* 357: 173-187.
- Wayne, E.S. 1980. Handbook on reference method for soil testing. 2nd Edition. University of Georgia, Athens, USA.
- Wünscher, R. 2013. A comparison of different phosphorus extraction methods with the phosphorus uptake of wheat. *Universität für Bodenkultur Wien, Vienna.*

- 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(2): 181-188. Available: <https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2007.00123.x>.
- Yusiharni, E and R. Gilkes. 2012. Minerals in the ash of Australian native plants. *Geoderma* 189: 369-380. Available: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.06.035>.
- Zhang, F., C. Huang, M. Yang, J. Zhang and W. Shi. 2019. Rainfall simulation experiments indicate that biochar addition enhances erosion of loess-derived soils. *Land degradation & development* 30(18): 2272-2286. Available: <https://doi.org/10.1002/ldr.3399>.