

คุณสมบัติถ่านที่มีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโตของข้าวโพดในดินทราย ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

Biochar properties affecting corn growth in a sandy soil of Northeast Thailand

สมชาย บุตรนันท์^{1*}, Jonathan L. Deenik², บรียง ทูมแสน³, Michael J. Antal⁴,
และ ปัทมา วิตยากร¹

Somchai Butnan^{1*}, Jonathan L. Deenik², Banyong Toomsan³, Michael J. Antal⁴,
and Patma Vityakon¹

บทคัดย่อ: ถ่านมีศักยภาพในการฟื้นฟูความอุดมสมบูรณ์ของดินทรายที่เสื่อมโทรมในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ อย่างไรก็ตามจะต้องพิจารณาจากคุณสมบัติถ่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารระเหยและเถ้า ซึ่งมีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโตของพืช ได้ทำการทดลองในเรือนทดลอง โดยเปรียบเทียบการใส่ถ่านที่ผลิตจากไม้ยูคาลิปตัส โดยวิธีพื้นบ้านของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งเผาที่อุณหภูมิต่ำ (~350°C) (ถ่านมีปริมาณสารระเหยได้สูง และเถ้าต่ำ) กับถ่านที่ผลิตด้วยวิธีสมัยใหม่ (Flash CarbonizationTM, FC) ซึ่งใช้อุณหภูมิสูง (800°C) อย่างจับพลัน (ถ่านมีปริมาณสารระเหยได้ต่ำ และเถ้าสูง) ในชุดดินโคราช (Kandiustults) ถ่านทั้งสองชนิดลดความเป็นพิษของ Al และ Mn ต่อข้าวโพด อย่างไรก็ตาม ถ่านที่มีปริมาณเถ้าสูง (ถ่าน FC) ทำให้เกิดปรากฏการณ์การเป็นปฏิปักษ์ระหว่างธาตุ K กับ Ca และ Mg ในข้าวโพด ทำให้การเจริญเติบโตลดลง สรุปได้ว่าถ่านผลิตโดยวิธีพื้นบ้านสามารถเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดินและการเจริญเติบโตของพืชที่ปลูกในดินทรายของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยปริมาณเถ้าที่ต่ำไม่ส่งผลด้านลบต่อพืช

คำสำคัญ: ดินเนื้อทรายที่เสื่อมโทรม, ปริมาณเถ้าของถ่าน, ไม้ยูคาลิปตัส, ความเป็นปฏิปักษ์ระหว่างธาตุอาหาร, ความเป็นพิษของธาตุต่อพืช

ABSTRACT: Biochar is promising to restore degraded sandy textured soils in Northeast Thailand. However, biochar properties, notably volatile matter (VM) and ash contents, have to be considered due to their effects on plant growth. A pot experiment was conducted to compare the application of biochar produced by the northeastern Thai traditional kiln (production temperature ~350°C) (high VM and low ash contents) with the modern Flash CarbonizationTM (800°C) (low VM and high ash contents) technique to the Khorat soil series (Kandiustults). Both biochars ameliorated Al and Mn phytotoxicities in corn. However, the FC biochar possessing high ash content led to K antagonistic effects to Ca and Mg lowering corn growth. It was concluded that the traditionally produced biochar could restore and improve soil fertility and plant growth in degraded sandy textured soils in Northeast Thailand. The low ash content of this biochar did not have negative effects on plant growth.

Keywords: degraded sandy textured soil, ash content of biochars, eucalyptus wood, nutrient antagonism, elemental phytotoxicities

¹ สาขาทรัพยากรที่ดินและสิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

Land Resources and Environment Section, Faculty of Agriculture, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002, Thailand

² Department of Tropical Plant and Soil Science, University of Hawaii, Hawaii 96822, USA

³ สาขาพืชไร่ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

Agronomy Section, Faculty of Agriculture, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002, Thailand

⁴ Hawaii Natural Energy Institute, University of Hawaii, Hawaii 96822, USA

* Corresponding author: sbutnan@kkumail.com

บทนำ

ความเสื่อมโทรมของดินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มีสาเหตุมาจากดินส่วนใหญ่เป็นเนื้อทราย และมีการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินจากป่าธรรมชาติมาเป็นการเกษตรที่ขาดการอนุรักษ์ดินอย่างเพียงพอ (Vityakon, 2001) การเพิ่มปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินเป็นแนวทางหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน ถ่านเป็นสารอินทรีย์ชนิดหนึ่งที่ใช้ในการเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดินมาตั้งแต่ยุคอารยธรรมโบราณ (Rebellato et al., 2009) และกำลังเป็นที่สนใจในศักยภาพที่จะปรับปรุงความอุดมสมบูรณ์ของดินจากนักวิทยาศาสตร์ทั่วโลก (Verheijen et al., 2014) ภาคตะวันออกเฉียงเหนือเป็นพื้นที่หนึ่งที่มีการผลิตถ่านมากโดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งใช้ในการหุงต้ม ทั้งในระดับครัวเรือน และในร้านอาหาร ทั้งในชนบทและในเมือง (Nansaior et al., 2011; Mwampamba et al., 2013) อย่างไรก็ตามยังมีการศึกษาน้อยที่แสดงถึงศักยภาพในการใช้ถ่านเป็นวัสดุปรับปรุงดินเสื่อมโทรมในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ไม่นานที่หลายหลายได้ถูกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่าน ในปัจจุบันจากการสำรวจของกลุ่มวิจัยพบว่ายุคาลิปต์สเป็นไม้เอนกประสงค์ที่มีการนำมาใช้ทำถ่านอย่างแพร่หลาย สำหรับวิธีการผลิตถ่านในภาคนี้ส่วนใหญ่แล้วเป็นวิธีพื้นบ้านดั้งเดิมและใช้อุณหภูมิต่ำ และจำแนกเป็นวิธีการเผาโดยให้อัตราความร้อนแบบช้า (slow pyrolysis) (Manya, 2012) อย่างไรก็ตามในปัจจุบันนี้มีการพัฒนาวิธีผลิตสมัยใหม่ที่ใช้เทคนิคที่ก้าวหน้าในการผลิตที่ทำให้ได้สัดส่วนระหว่างผลผลิตถ่านต่อวัตถุดิบสูง เช่น วิธีที่ใช้อุณหภูมิสูงแบบฉับพลัน (Flash Carbonization™) ที่พัฒนาขึ้นที่สถาบันพลังงานธรรมชาติฮาวาย (Hawaii Natural Energy Institute) มหาวิทยาลัยฮาวาย สหรัฐอเมริกา แม้มีบางผลงาน

วิจัยที่รายงานถึงอิทธิพลของถ่านต่อการเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน แต่ในแง่การเจริญเติบโตของพืช มีผลวิจัยที่แสดงว่าถ่านบางชนิดทำให้พืชขาดธาตุ K (Chan et al., 2008), N, และ P (Makoto et al., 2011) จากการวิเคราะห์ห่อภิมาณ (meta-analysis) เกี่ยวกับความไม่สอดคล้องกันของอิทธิพลของถ่านต่อความอุดมสมบูรณ์ของดินและการเจริญเติบโตของพืชของ Jeffery et al. (2011) พบว่าปัจจัยหนึ่งที่สำคัญคือคุณสมบัติที่ต่างกันของถ่าน

คุณสมบัติของถ่านที่ผลิตจากวัตถุดิบชนิดเดียวกันจะเปลี่ยนแปลงตามสภาพการเผา (pyrolysis condition) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง อุณหภูมิ ความดัน และปริมาณ O_2 (Antal and Gronli, 2003) เช่น ถ่านที่ผลิตภายใต้อุณหภูมิต่ำจะมีปริมาณสารที่ระเหยได้ (volatile matter, VM) สูง แต่มีปริมาณคาร์บอนเสถียร (fixed C, fC) และเถ้า (ash) ต่ำ แต่ถ่านที่ผลิตภายใต้อุณหภูมิสูง จะมีองค์ประกอบเหล่านี้ในปริมาณตรงกันข้ามกับข้างต้น Deenik et al. (2011) พบว่าถ่านที่มี VM สูง ทำให้การเจริญเติบโตของพืชลดลง เนื่องจากทำให้พืชขาด N ในขณะที่ถ่านที่มีเถ้าสูงจะเพิ่มการเจริญเติบโตของพืช เนื่องจากเถ้าทำให้ pH ของดินเพิ่มขึ้นเป็นผลให้ความเป็นพิษของ Al ลดลง และเถ้าเป็นแหล่งของธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับพืชโดยเฉพาะอย่างยิ่ง K, Ca, และ Mg อย่างไรก็ตามดินที่ใช้ในศึกษาของ Deenik et al. (2011) เป็นดินเนื้อละเอียด ซึ่งอิทธิพลของถ่านอาจแตกต่างออกไปในดินเนื้อหยาบ

สมมติฐานของการศึกษานี้คือ ถ่านที่ผลิตจากไม้ยุคาลิปต์สภายใต้อุณหภูมิต่ำ (VM สูงและเถ้าต่ำ) ทำให้การเจริญเติบโตของพืชลดลง ในขณะที่ถ่านผลิตจากไม้ชนิดนี้ภายใต้อุณหภูมิสูง (VM ต่ำและเถ้าสูง) ทำให้การเจริญเติบโตของพืชเพิ่มขึ้น ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการศึกษานี้คือ เพื่อประเมินอิทธิพลของถ่านที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันในการปรับปรุงความอุดมสมบูรณ์ของดินเนื้อทรายในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

วิธีการศึกษา

ดินและถ่านที่ใช้ในการศึกษา

ดินที่ใช้ในการศึกษาเป็นชุดดินโคราช (isohyperthermic Typic Oxyaquic Kandistults) ที่เก็บมาจากระดับความลึก 0 – 15 cm นำดินไปผึ่งให้แห้งแล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 mm แล้วเก็บไว้ในภาชนะพลาสติกที่อุณหภูมิห้อง คุณสมบัติของชุดดินโคราชแสดงใน Table 1

ถ่านที่ใช้ในการศึกษาคือ (1) ถ่านที่ผลิตด้วยวิธีพื้นบ้าน (TK) ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งใช้เวลาในการเผา 3 วัน ที่อุณหภูมิต่ำ (~350°C) และปล่อยให้เย็น

อีก 4 วัน และ (2) ถ่านที่ผลิตด้วยวิธีสมัยใหม่ใช้เทคนิคกักน้ำ Flash Carbonization™ (FC) ซึ่งเผาโดยให้ความร้อนแบบฉับพลัน (40 นาที) ที่อุณหภูมิสูง (800°C) แบบฉับพลัน ดูรายละเอียดของแต่ละวิธีใน Butnan et al. (2015) ถ่านทั้งสองชนิดผลิตจากไม้ชนิดเดียวกันคือ ส่วนปลายของไม้ยูคาลิปตัส (*Eucalyptus camaldulensis*) นำถ่านทั้งสองชนิดไปบดแล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 mm เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่าน ซึ่งแสดงไว้ใน Table 1 ทำการขนส่งชุดดินโคราช ถ่าน TK และไม้ยูคาลิปตัสไปยังมหาวิทยาลัยฮาวาย เพื่อทำการทดลองในเรือนทดลอง

Table 1 Initial properties of the Khorat soil and traditional kiln (TK) and Flash Carbonization™ (FC) biochars used in this study^{1/}.

Soil/biochar ^{2/}	Proximate analysis (%)			Soil texture	pH	Extractable element				
	VM	Ash	fC			Mineral N	K	Ca	Mg	Al
					(soil/biochar:H ₂ O = 1:5)	(mg kg ⁻¹)	----- (g kg ⁻¹) -----			
Khorat soil	-	-	-	Loamy sand	5.52	23.59	0.014	0.11	0.021	0.011
TK biochar	35.79	2.35	61.86	-	6.52	24.26	5.1	5.41	0.43	0.14
FC biochar	14.65	3.85	81.50	-	8.92	11.87	7.81	10.42	0.59	0.33

^{1/}This table is adapted from Butnan et al. (2015). ^{2/}For analytical methods refer to Butnan et al. (2015).

การทดลองในเรือนทดลอง

การศึกษานี้วางแผนทดลองแบบ Randomized Complete Block design (RCBD) ประกอบด้วย 3 กรรมวิธีทดลอง คือ (1) ไม่ใส่ถ่าน (control), (2) ใส่ถ่าน TK 4% โดยน้ำหนัก (w/w), และ (3) ใส่ถ่าน FC 4% w/w จำนวน 3 ซ้ำ โดยผสมถ่านของแต่ละกรรมวิธีกับชุดดินโคราชน้ำหนัก 2 kg ในกระถางที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 cm และความสูง 17 cm (ขนาด 3016 cm³) ปลูกข้าวโพด 2 ครั้ง ครั้งละ 39 วัน ใส่ถ่านเพียงครั้งเดียวคือ ก่อนปลูกข้าวโพดครั้งที่ 1 ปลูกข้าวโพด 2 ต้น/กระถาง เก็บเกี่ยวข้าวโพดในวันที่ 39 หลังปลูก การใส่ปุ๋ยรองพื้น การจัดการและดูแลการทดลอง วิธีการ

เก็บตัวอย่าง และวิธีวิเคราะห์ดินและพืชในห้องปฏิบัติการ ตามรายละเอียดใน Butnan et al. (2015)

การวิเคราะห์ทางสถิติ

เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างกรรมวิธีของ มวล (น้ำหนักแห้ง) ของข้าวโพด ด้วยวิธี Tukey's Studentized Range Test โดยใช้โปรแกรม SAS v. 9.1 (SAS Institute, Cary, NC) และวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of the determination, r²) และสมการการถดถอย (regression equation) ด้วยโปรแกรม Sigmaplot v.12.5 (SYSTAT software, Inc., Chicago, IL) การวิเคราะห์ทางสถิติทั้งหมดพิจารณาความแตกต่างทางสถิติที่ $p \leq 0.05$

ผลการศึกษา

อิทธิพลของถ่านต่อการเจริญเติบโตของข้าวโพด

ในการปลูกครั้งที่ 1 ถ่าน FC ทำให้มวลข้าวโพดมีแนวโน้มต่ำกว่าไม่ใส่ถ่าน (control) ในขณะที่ถ่าน TK ทำให้มวลมีแนวโน้มสูงกว่า control (Figure 1a) ในการปลูกครั้งที่ 2 ถ่านทั้งสองชนิดทำให้มวลสูงกว่า control อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Figure 1b) นอกจากนี้พบว่าถ่าน FC ทำให้มวลข้าวโพดต่ำกว่าที่ใส่ถ่าน TK อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในการปลูกทั้งสองครั้ง

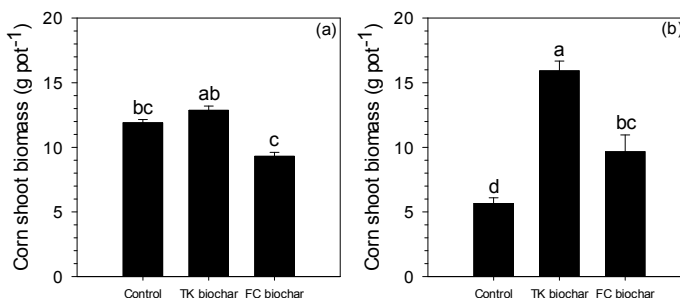


Figure 1 Corn shoot biomass in (a) crop cycle 1 and (b) crop cycle 2. Error bars represent standard error of the mean (SEM). This figure is adapted from Butnan et al. (2015).

วิจารณ์

ถ่านที่มีปริมาณเถ้าสูงทำให้เกิดปรากฏการณ์การเป็นปฏิปักษ์ระหว่างธาตุอาหารในพืช

องค์ประกอบเถ้าของถ่านเป็นแหล่งที่สำคัญของธาตุประจวบที่มีฤทธิ์เป็นด่าง (basic cations) นั่นคือ K, Ca, และ Mg อย่างไรก็ตาม พืชสามารถดูดใช้ K ได้เกินความจำเป็นต่อการเจริญเติบโต (K luxury consumption) (Römheld, 2012) ทำให้ K เป็นปฏิปักษ์ (K antagonism) ต่อการดูดใช้ Ca และ Mg จนทำให้พืชเกิดภาวะขาด Ca ($> 5 \text{ g kg}^{-1}$) และ Mg ($> 1.5 \text{ g kg}^{-1}$) (Reuter et al., 1997) เป็นผลให้การเจริญเติบโต

ความสัมพันธ์ระหว่างธาตุอาหารในดินกับธาตุอาหารในเนื้อเยื่อข้าวโพด และการเจริญเติบโตของข้าวโพด

ความเข้มข้นของ K ในดินที่เพิ่มขึ้นทำให้ K ในเนื้อเยื่อข้าวโพดเพิ่มขึ้นในการปลูกครั้งแรก (Figure 2a) แต่ทำให้ Ca และ Mg ในเนื้อเยื่อ และมวลข้าวโพดลดลงในการปลูกทั้งสองครั้ง (Figure 2a and 2b)

ในการปลูกครั้งที่สอง ปริมาณเถ้าในดินที่เพิ่มขึ้นทำให้ pH ของดินเพิ่ม แต่ทำให้ความเข้มข้นของ Al ในดิน (Figure 2c) และความเข้มข้นของ Mn และอัตราส่วนระหว่าง Mn:Ca ในเนื้อเยื่อ (Figure 2d) ลดลง ในขณะที่มวลข้าวโพดเพิ่มขึ้นที่ระดับเถ้าที่ใส่ในดินเป็น 9.4 mg kg^{-1} soil (ปริมาณเถ้าจากการใส่ถ่าน TK) แต่ที่ระดับเถ้าที่ใส่ในดินสูงกว่าระดับนี้มวลชีวภาพของข้าวโพดลดลง ซึ่งเป็นปริมาณเถ้าของถ่าน FC (Figure 2c and 2d)

ของพืชลดลง

ถ่านลดความเป็นพิษของ Al และ Mn ในพืช

ในสภาพที่ดินมีปริมาณ Al และ Mn สูงจนเป็นพิษต่อพืช เถ้าเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของถ่านที่ลดความเป็นพิษของ Al (Figure 2c) และ Mn (Figure 2d) ในพืช ซึ่งเห็นได้ชัดเจนในการปลูกข้าวโพดครั้งที่สอง กลไกการลดความเป็นพิษจากเถ้า คือ (1) pH ของดินเพิ่มขึ้น ทำให้ Al ตกตะกอน (Berek et al., 2011) (2) แร่ออกไซด์และซิลิเกต เช่น อัลไบต์ (albite) และคริสโตบาไลต์ (cristobalite) ในเถ้าดูดซับ Al เอาไว้ (Qian and Chen, 2013) นอกจากนี้ถ่านยังลดความเป็นพิษของ Al ได้โดยดูดซับ Al ไว้ที่หมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลและ

คาร์บอนซัลไฟฟิวของถ่าน (Qian and Chen, 2013) ส่วนการลดความเป็นพิษของ Mn โดยถ่านนั้น อาจเกิดจาก Ca จากถ่านแก่งแย่งแข่งขันกับ Mn ในการถูกดูดใช้โดยพืช (Hue and Mai, 2002) นอกจากนี้ยังเกิดจากเกิดกระบวนการคีเลต (chelation) ระหว่าง Mn กับ สารประกอบ VM บางสารในถ่าน เช่น acetic acid, citric acid, oxalic acid, oxalic acid, และ lalic acid (Hue et al., 2001) ซึ่งกรดเหล่านี้มีรายงานว่า เป็นองค์ประกอบของ VM ในถ่าน (Martius et al., 2012)

สรุป

ถ่านจากไม้ยูคาลิปตัสทั้งสองชนิดที่ผลิตที่ อุณหภูมิต่ำและสูง สามารถปรับปรุงความอุดมสมบูรณ์ของดินเนื้อทรายในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

ได้โดยการเพิ่ม pH ของดินและให้ธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อการเจริญเติบโตของพืช และลดความเป็นพิษของ Al และ Mn ในพืช เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง ถ่านสองชนิดพบว่าถ่านที่มีปริมาณธาตุต่ำคือ ถ่านที่เผา ที่อุณหภูมิต่ำ (วิธีพื้นบ้าน) ทำให้การเจริญเติบโตของพืชสูงกว่าถ่านที่มีปริมาณธาตุสูง (ถ่านผลิตวิธีสมัยใหม่ที่อุณหภูมิสูง) ซึ่งตรงข้ามกับสมมติฐานของการศึกษานี้ เนื่องจากถ่านที่มีปริมาณธาตุสูงทำให้เกิดปรากฏการณ์การเป็นปฏิปักษ์ระหว่างธาตุอาหารในพืช จึงเห็นว่าถ่านที่ผลิตโดยวิธีพื้นบ้านในภาคตะวันออกเฉียงเหนือนอกจากจะใช้เป็นแหล่งพลังงานแล้ว ยังสามารถใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินเนื้อทรายได้อย่างมีประสิทธิภาพได้ อย่างไรก็ตามจะต้องมีการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการใช้ถ่านเพื่อสนองทั้งสองวัตถุประสงค์ ได้แก่ การศึกษาปริมาณ การกระจาย และการบริโภคของถ่านที่ผลิตในภาคนี้

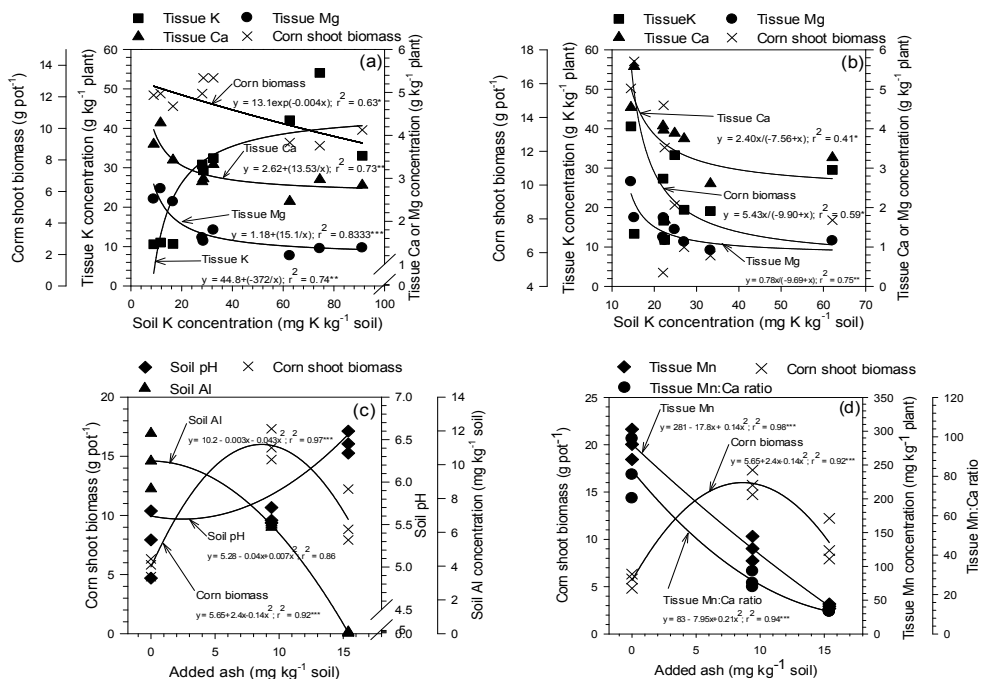


Figure 2 Biochar effects on soil properties and plant growth: (a) relationships of soil K concentration with tissue K, Ca, and Mg concentrations and corn shoot biomass in crop cycle 1; (b) relationships of soil K concentration with tissue K, Ca, and Mg concentrations and corn shoot biomass in crop cycle 2; (c) relationships of added ash content with soil pH, soil Al, and corn shoot biomass in crop cycle 2; (d) relationships of added ash content with tissue Mn, tissue Mn:Ca ratio, and corn shoot biomass in crop cycle 2.

คำขอบคุณ

การศึกษานี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก (คปก.) ภายใต้กองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) (PHD/0222/2549) และส่วนหนึ่งของการศึกษานี้ได้รับทุนสนับสนุนจากทุนอุดหนุนทั่วไปมหาวิทยาลัยขอนแก่น (ปี 2553-2554) ทุนวิจัยพื้นฐานของ สกว. (ปี 2551 และ 2554) ทุนข้อตกลงความร่วมมือระหว่าง East-West Center มหาวิทยาลัยฮาวาย และสกว. ทุน Water Energy and Soil Sustainability (WESS) Program ที่ให้แก่ Sustainability Initiative (Chancellor's Office, University of Hawaii at Manoa) ถ่านและไม้ยูคาลิปตัสได้รับบริจาคมาจากสถานีสวนป่ามัญจาคีรี จ.ขอนแก่น และขออุทิศผลงานวิจัยฉบับนี้แด่ Prof.Dr.Goro Uehara และ Prof.Dr.Kuan M. Goh ผู้จัดประกายการศึกษานี้

เอกสารอ้างอิง

- Antal, M. J. and M. Gronli. 2003. The art, science, and technology of charcoal production. *Ind. Eng. Chem. Res.* 42: 1619-1640.
- Berek, A. K., N. V. Hue, and A. Ahmad. 2011. Beneficial use of biochar to correct soil acidity. *Hānai'Ai / The Food Provider*. University of Hawaii.
- 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. V. Zwieten, I. Meszaros, A. Downie, and S. Joseph. 2008. Using poultry litter biochars as soil amendments. *Aust. J. Soil Res.* 46: 437-444.
- 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.
- Hue, N. V. and Y. Mai. 2002. Manganese toxicity in watermelon as affected by lime and compost amended to a Hawaiian acid oxisol. *HortScience* 37: 656-661.
- Hue, N. V., S. Vega, and J. A. Silva. 2001. Manganese toxicity in a Hawaiian Oxisol affected by soil pH and organic amendments. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 153-160.
- Jeffery, S., F. G. A. 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. *Agr. Ecosyst. Environ.* 144: 175-187.
- 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.
- Martius, S. v., K. A. Hammer, and C. Locher. 2012. Chemical characteristics and antimicrobial effects of some *Eucalyptus kinos*. *J. Ethnopharmacol.* 144: 293-299.
- Mwampamba, T. H., A. Ghilardi, K. Sander, and K. J. Chaix. 2013. Dispelling common misconceptions to improve attitudes and policy outlook on charcoal in developing countries. *Energy Sustain. Dev.* 17: 75-85.
- Nansaior, A., A. Patanothai, A. T. Rambo, and S. Simaraks. 2011. Climbing the energy ladder or diversifying energy sources? The continuing importance of household use of biomass energy in urbanizing communities in Northeast Thailand. *Biomass Bioenergy* 35: 4180-4188.
- Qian, L. and B. Chen. 2013. Dual role of biochars as adsorbents for aluminum: The effects of oxygen-containing organic components and the scattering of silicate particles. *Environ. Sci. Technol.* 47: 8759-8768.
- Rebellato, L., W. I. Woods, and E. G. Neves. 2009. Pre-Columbian settlement dynamics in the Central Amazon. P. 15-31. In W. I. Woods, W. G. Teixeira, J. Lehmann, C. Steiner, A. M. G. A. WinklerPrins, and L. Rebellato. *Amazonian Dark Earths: Wim Sombroek's Vision*. Springer Science+Business Media B.V., London.
- Reuter, D. J., D. G. Edwards, and N. S. Wilhelm. 1997. Temperate and tropical crops. P. 83-284. In D. J. Reuter and J. B. Robinson. *Plant Analysis: An Interpretation Manual*. Inkata Press, Melbourne.
- Römheld, V. 2012. Diagnosis of deficiency and toxicity of nutrients. P. 299-312. In P. Marschner. *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. 3rd Edition. Academic Press, San Diego.
- Verheijen, F. G. A., E. R. Graber, N. Ameloot, A. C. Bastos, S. Sohi, and H. Knicker. 2014. Biochars in soils: New insights and emerging research needs. *Eur. J. Soil Sci.* 65: 22-27.
- Vityakon, P. 2001. The role of trees in countering land degradation in cultivated fields in Northeast Thailand. *S. E. Asian Stud.* 39: 398-416.