

การผลิตถ่านชีวภาพมูลสัตว์โดยเตาเผาพื้นบ้านสองแบบเพื่อเป็นแนวทาง เก็บกักคาร์บอน และเพิ่มธาตุอาหารพืชในดิน

Production of animal manure biochar using two different local traditional kilns as a guideline for carbon sequestration and increase plant nutrients in the soil

ภานุเดชา กมลมานิตย์^{1*} สินธนา แก้วฝ้ายนอก¹ และ พฤกษา หล้าวงษา²

Bhanudacha Kamolmanit^{1*} Sintana Kaewfainok¹ and Phrueksa Lawongsa²

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางเคมีและชีววิทยาของถ่านชีวภาพจากมูลแพะและโคที่ผลิตจากการเผาด้วยเตา 2 แบบ เพื่อเป็นแนวทางใช้ประโยชน์จากถ่านในการเก็บกักคาร์บอนในดินและเพิ่มธาตุอาหารหลักพืช (N P และ K) การทดลองประกอบด้วย 6 กรรมวิธีทดลอง ดังนี้ 1) มูลแพะสด 2) ถ่านชีวภาพมูลแพะ (เตาหลุมกลบ) 3) ถ่านชีวภาพมูลแพะ (เตาดินเหนียวก่อ) 4) มูลวัวสด 5) ถ่านชีวภาพมูลวัว (เตาหลุมกลบ) และ 6) ถ่านชีวภาพมูลวัว (เตาดินเหนียวก่อ) ผลการศึกษาพบว่าถ่านชีวภาพมูลสัตว์ที่ผลิตจากเตาทั้งสองแบบส่งผลให้ค่า pH เพิ่มขึ้นกว่ามูลสัตว์ที่ไม่ผ่านการเผา ($P < 0.05$) เตาหลุมกลบส่งเสริมการเพิ่ม total N, และ total K ขณะที่เตาดินเหนียวก่อสามารถเพิ่ม total P ได้สูงสุดในมูลสัตว์ทั้งสองชนิด กรรมวิธี GM biochar (PK) ส่งผลให้ปริมาณ N และ K เพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากับ 2.14 และ 7.25% เทียบกับมูลแพะสด ($P < 0.05$) ขณะที่กรรมวิธี CM biochar (PK) ส่งผลให้ปริมาณ N และ K เพิ่มขึ้นสูงสุดเท่ากับ 2.55 และ 6.23% เทียบกับมูลวัวสด ($P < 0.05$) กรรมวิธี GM biochar (MK) ส่งผลให้คาร์บอนที่ออกซิไดส์ได้ง่ายลดลงต่ำสุด (64.159 g/kg) คาร์บอนที่เสถียร (fixed C) เพิ่มขึ้นเท่ากับ 1.03% ($P < 0.05$) การศึกษานี้พบว่าดัชนีการงอกของเมล็ด (germination index, GI) สูงสุดในกรรมวิธี GM biochar (PK) มีค่าเท่ากับ 146.94 ขณะที่กรรมวิธี CM biochar (PK) มีค่าเท่ากับ 19.05 ($P < 0.05$) ขณะที่คาร์บอนที่ออกซิไดส์ได้ง่ายแสดงความสัมพันธ์ในทางบวกกับดัชนีการงอกเมล็ด (0.5413, $P < 0.05$) และเปอร์เซ็นต์การงอกเมล็ด (0.6672, $P < 0.05$) การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าเตาดินเหนียวก่อลดปริมาณคาร์บอนที่ออกซิไดส์ได้ง่ายและสลายได้มากที่สุดที่สูงสุดในถ่านชีวภาพมูลสัตว์ทั้งสองชนิด จึงเหมาะสมนำมาใช้เพื่อการเก็บกักคาร์บอนในดิน ขณะที่เตาหลุมกลบช่วยเพิ่ม total N และ total K ได้มากที่สุด จึงเหมาะสมในการใส่ลงดินเพื่อการเพิ่มธาตุอาหารพืช

คำสำคัญ: เตาเผาถ่านพื้นบ้าน ถ่านชีวภาพมูลสัตว์ คาร์บอนรูปที่เสถียร ธาตุอาหารพืช การงอกเมล็ด

Received Augst 20, 2019

Accepted April 9, 2020

¹ หลักสูตรวิชาเกษตรศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา นครราชสีมา 30000

¹ Course of Agriculture, Faculty of Science and Technology, Nakhon Ratchasima Rajabhat University, 30000

² สาขาปฐพีศาสตร์และสิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 40002

² Department of Soil Science and Environment Faculty of Agriculture, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002

* Corresponding author: bhanudacha@yahoo.com

ABSTRACT: The objective of this research was to study the chemical and biological properties of biochar from goat and cow manure produced by two different local traditional kilns to be a guideline C sequestration in the soil and increase plant nutrient elements (N, P, and K). The experiment consisted of 6 treatments as follows: 1) fresh goat manure (GM) 2) GM biochar (pit kiln, PK) 3) GM biochar (mound kiln, MK) 4) fresh cow manure 5) CM biochar (pit kiln, PK) and 6) CM biochar (mound kiln, MK). The results showed that the animal manure biochar produced from both kilns resulted in a higher pH value than the fresh manure ($P < 0.05$). The pit kiln promotes increasing total N, and total K, while the mound kiln can increase the total P in both animal manure types. GM biochar (PK) treatment results in increased N and K content (2.14 and 7.25%, respectively) compared with fresh goat ($P < 0.05$) while CM biochar (PK) treatment results in the highest N and K (2.55 and 6.23%, respectively) compared with fresh cow manure ($P < 0.05$). The treatment of GM biochar (MK) results in the minimum reduction of easily oxidized organic C (64.159 g / kg) but an increase in fixed C by 1.03% ($P < 0.05$). This study found that the germination index, the highest in GM biochar (PK) was 146.94, while CM biochar (PK) was 19.05 ($P < 0.05$). Meanwhile, the easily oxidized organic C showed a positive relationship with seed germination index (0.5413, $P < 0.05$) and seed germination percentage (0.6672, $P < 0.05$). This study shows that the mound kiln could reduce the amount of oxidized carbon and the most volatile matters in both two types of animal manure which was suitable for the sequestration of C in the soil. The pit kiln helps to increase the total N and K; therefore, it is considered appropriate for the production of biochar in terms of increasing the plant nutrient.

Keywords: local kiln, animal manure biochar, fixed C, plant nutrients, germination index

บทนำ

ถ่านชีวภาพยังคงได้รับความสนใจในการศึกษาเพื่อการฟื้นฟูดินเสื่อมโทรมให้มีความอุดมสมบูรณ์เพิ่มขึ้น ถ่านชีวภาพมีสมบัติเป็นแหล่งของธาตุอาหารพืชที่สำคัญเนื่องจากมีความสามารถในการดูดซับและแลกเปลี่ยนประจุบวกบนพื้นผิวที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นประจุลบ อาทิ คาร์บอกซิล (-COOH), ไฮดรอกซิล (-OH) และคาร์บอนิล (-C=O) (Joseph et al., 2009) ถ่านจึงสามารถดูดซับธาตุอาหารพืชประจุบวกไว้ได้มากและสามารถที่จะปลดปล่อยประจุเหล่านั้นแก่ดิน สมบัติดังกล่าวทำให้ถ่านชีวภาพเป็นทั้งแหล่งรับ (sink) และแหล่งจ่าย (source) ธาตุอาหารพืชที่คล้ายสมบัติอนุภาคคอลลอยด์ดิน (Buckman and Brady, 1972; Curtin and Syers, 1990) การศึกษาการผลิตถ่านชีวภาพส่วนใหญ่ได้ให้ความสนใจในการใช้วัตถุดิบจากไม้ยืนต้น อาทิ ยูคาลิปตัส (Kaewpradit and Toomsan, 2019) วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น แขนข้าวโพด (Rajkovich et al., 2012) อย่างไรก็ตามข้อมูลล่าสุดพบว่า

ประเทศไทยมีการใช้พลังงานหมุนเวียนดั้งเดิมที่ส่วนใหญ่เป็นพลังงานจากถ่านและฟืนลดลงเท่ากับ 7.14% ซึ่งมีสาเหตุสำคัญจากการลดลงของวัตถุดิบประเภทไม้ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2562) แนวทางการใช้พืชโตเร็ว เช่น สนุ่ด้าลูกผสมข้ามสายพันธุ์ในสกุล *Jatropha* sp. ที่พบว่ามีมีการเจริญเติบโตและให้ชีวมวลสูงกว่าสายพันธุ์เดิม (อนุรักษ์ และคณะ, 2561) จึงเป็นที่น่าสนใจและยังมีรายงานการนำส่วนของใบมาใช้ผลิตถ่านชีวภาพในการปรับปรุงดินเนื่องจากมี C เป็นองค์ประกอบ 22.7% และธาตุอาหารพืช N P และ K เท่ากับ 1.5 0.14 และ 0.62% ตามลำดับ (Konaka et al., 2019) การผลิตถ่านชีวภาพจากมูลสัตว์จึงได้รับความสนใจเนื่องจากการลดปริมาณของเสียเหลือทิ้งจากฟาร์มและลดการปล่อย CO₂ สู่บรรยากาศที่เป็นสาเหตุของภาวะโลกร้อน (Fraser, 2010) จากการศึกษาโดยสินธนาและภาณุเดชา (2562) พบว่าถ่านชีวภาพมูลแพะสามารถเพิ่มคาร์บอนส่วนที่เสถียร (fixed C) และธาตุอาหารหลักพืช (N P และ K) ให้เพิ่มสูงขึ้นได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้

หลายประการ อาทิ แหล่งเชื้อเพลิง ปุ๋ย และสารปรับปรุงดิน เป็นต้น (Sohi et al., 2009) ทั้งนี้ในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมาที่มีการเผาถ่านสองแบบที่แพร่หลายมาเป็นเวลานาน คือ การเผาแบบเตาหลุมกลบหรือหลุมผี และแบบเตาดินก่อโดยใช้ดินเหนียวปั้น (ไอเอ็นเอ็น นิวส์, 2561; โคราช สตาร์ทอัพ, 2561) โดยการผลิตถ่านทั้งสองวิธีมีการใช้ความร้อนและความดันซึ่งอาจเป็นปัจจัยสำคัญส่งผลต่อสมบัติของถ่านที่ผลิตได้ โดยสินธนาและภาณุเดชา (2562) รายงานว่าการผลิตถ่านจากมูลแพะด้วยเตาหลุมกลบส่งผลให้ปริมาณ N และ K เพิ่มสูงกว่าการผลิตด้วยเตาดินเหนียวก่อ ผู้วิจัยอภิปรายว่าเตาหลุมกลบมีอุณหภูมิและความดันที่ต่ำกว่าเตาดินก่อซึ่งอาจเกิดจากโครงสร้างเตาและชนิดของดินที่นำมาใช้สร้างเตา ขณะเดียวกันในปัจจุบันยังไม่พบการศึกษาเชิงเปรียบเทียบปัจจัยด้านวัตถุดิบโดยเฉพาะมูลสัตว์ต่างชนิดระหว่างเตาเผาพื้นบ้านทั้งสองแบบ ซึ่งสมบัติบางประการทางกายภาพ อาทิ รูปร่างและความหนาแน่น และสมบัติทางเคมี ได้แก่ ปริมาณธาตุอาหาร เป็นต้น ซึ่งอาจส่งผลต่อคุณภาพของถ่านชีวภาพที่ผลิตได้ ข้อมูลรายงานของกรมปศุสัตว์ (2561) พบว่าภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีการเลี้ยงโคนมจำนวนกว่า 200,000 ตัว และมีการเลี้ยงแพะจำนวนกว่า 60,000 ตัว โดยมูลแพะและโคมีศักยภาพในการปล่อยก๊าซเรือนกระจก 93.4 และ 31 L/kg-WS CO₂ eq. ตามลำดับ (Sowunmi et al., 2015) มูลสัตว์ทั้ง 2 ชนิดจึงเป็นแหล่งกำเนิดก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญ ขณะเดียวกันทั้งมูลแพะและโคมีอินทรีย์คาร์บอนเป็นองค์ประกอบใกล้เคียงกัน (18.22 และ 18.16 % ตามลำดับ) (Zhang et al., 2013; Khater, 2015) มูลแพะและโคจึงมีศักยภาพในการนำมาผลิตเป็นถ่านชีวภาพเพื่อให้ได้คาร์บอนในรูปแบบที่เสถียรเพื่อการสะสมในดิน ลดการปลดปล่อย CO₂ สู่บรรยากาศ และช่วยเพิ่มธาตุอาหารพืชให้กับดิน งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) เปรียบเทียบธาตุอาหารหลัก (N P และ K) และคาร์บอนในรูปแบบต่างๆ ทั้งรูปที่เสถียรและรูปที่ออกซิไดส์ได้ง่ายของมูลสัตว์สองชนิดภายใต้รูปแบบการเผาที่แตกต่างกัน คือ เตาดินเหนียวก่อ (Mound kiln, MK) และเตาหลุมกลบ (Pit kiln, PK) เพื่อให้ได้รูปแบบเตาสำหรับผลิตถ่านที่เหมาะสมกับวัตถุดิบที่ต่างกันทั้งด้านสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมี และ 2) วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างรูปของคาร์บอนในถ่าน

ชีวภาพมูลสัตว์ที่สัมพันธ์กับปริมาณธาตุอาหารพืชและดัชนีการงอกเมล็ด เพื่อเป็นแนวทางการประเมินรูปแบบการผลิตถ่านชีวภาพที่มีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

วิธีการศึกษา

มูลวัวได้รับความอนุเคราะห์จากฟาร์มวังนม ต. ห้วยยายจิว อ. เทพสถิต จ. ชัยภูมิ (15°31'41.02"N 101°28'12.2"E) มูลแพะได้จากฟาร์มสำนักงานเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ. นครราชสีมา บรรจุมูลสัตว์ในบีบสี่เหลี่ยม (square can) ขนาด 0.25 x 0.25 x 0.35 เมตร ทำการเผาด้วยเตา 2 แบบ คือ เตาดินเหนียวก่อ (Mound kiln, MK) โดยสร้างเตาขนาดกว้าง x ยาว x ลึก เท่ากับ 1.20 x 2 x 1.20 เมตร และเตาหลุมกลบ (Pit kiln, PK) ใช้วิธีสร้างหลุมขนาดกว้าง x ยาว x ลึก เท่ากับ 1 x 0.8 x 0.40 เมตร ณ บ้านน้อยรวมมิตร อ. บัวใหญ่ จ. นครราชสีมา (15°36'12.2"N 102°26'42.8"E) เตาดินก่อใช้เวลาเผา 3 วันและอบ 7 วัน เตาหลุมกลบใช้เวลาเผา 2 วันและอบ 5 วัน ทำการทดลอง 3 ซ้ำ เก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ตัวชี้วัด ได้แก่ pH (วัสดุต่อน้ำ = 1: 10) คาร์บอนที่ออกซิไดส์ได้ด้วยไดโครเมต (K₂Cr₂O₇) ตามวิธีของ Walkley (1947) ไนโตรเจนทั้งหมดโดยวิธี micro Kjeldahl ฟอสฟอรัสทั้งหมดโดยวิธี colorimetric method (Olsen and Sommers, 1982) ไปเตสเซียมทั้งหมดโดยวิธี Atomic absorption spectrophotometer ค่า Proximate ตามวิธีมาตรฐาน ASTM 1762-84 (American Standard of Testing Material, 2007) โดยอบตัวอย่างที่อุณหภูมิ 105 °C จนน้ำหนักคงที่ วิเคราะห์ปริมาณสารระเหย (Volatile matter, VM) โดยเผาตัวอย่างที่อุณหภูมิ 950 °C เป็นเวลา 6 นาที วิเคราะห์เถ้า (Ash) โดยเผาตัวอย่างที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ทดสอบดัชนีการงอกของเมล็ด (Germination index, GI) ตามวิธีของ Oktiawan et al. (2018) โดยเขย่าวัสดุอินทรีย์ในน้ำกลั่น (วัสดุต่อน้ำ = 1: 10) บนเหยียงที่ความเร็วรอบ 3,000 rpm 15 นาที นำส่วน supernatant ปริมาตร 10 ml. มาใช้ทดสอบการงอกของเมล็ดข้าวโพด 10 เมล็ดต่อ 1 ซ้ำ การทดลอง ทำการทดสอบ 3 ซ้ำ ข้อมูลจากค่าวิเคราะห์ตัวชี้วัดต่างๆ นำมาวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนตามแผนการทดลองแบบ RCBD เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่าง

กรรมวิธีทดลองโดยวิธี Least Significant Difference (LSD) ($P < 0.05$) โดยโปรแกรม Statistix version 8.0

ผลการศึกษาและวิจารณ์

รูปแบบการเผาต่อสมบัติทางเคมีของถ่านชีวภาพมูลสัตว์

ปริมาณธาตุอาหารหลักที่พืช ได้แก่ ไนโตรเจนทั้งหมด (total N) ฟอสฟอรัสทั้งหมด (total P) และโปแตสเซียมทั้งหมด (total K) (Figure 1A-F) เมื่อพิจารณารูปแบบการเผาที่แตกต่างกันพบว่า การเผาด้วยวิธีแบบหลุมกลบ (PK) ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ N และ K ของถ่านชีวภาพมูลสัตว์สูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) (Figure 1A, E) เช่นเดียวกับถ่านชีวภาพมูลแพะที่พบว่าเปอร์เซ็นต์ N และ K เพิ่มขึ้นสูงสุด ($P < 0.05$) (Figure 1B, F) สอดคล้องกับรายงานของสินธนาและภาณุเดชา (2562) ที่พบว่า การผลิตถ่านจากมูลแพะด้วยเตาหลุมกลบส่งผลให้ปริมาณ N และ K เพิ่มขึ้นสูงกว่าเตาดินเหนียวก่อนการเพิ่มขึ้นของ N ในการเผาแบบหลุมกลบของถ่านชีวภาพมูลวัวและแพะ (Figure 1A, B) ซึ่งให้เห็นว่ามูลสัตว์สามารถนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านชีวภาพในแง่เพื่อการเพิ่มเปอร์เซ็นต์ธาตุอาหารพืชได้ เนื่องจากมูลสัตว์เป็นแหล่งของธาตุอาหารที่สำคัญหลายชนิดอีกทั้งยังมี C เป็นองค์ประกอบซึ่งเกิดจากวัตถุดิบที่ใช้เลี้ยงสัตว์ โดยพบทั้ง C ส่วนที่ง่ายต่อการย่อยสลาย เช่น เซลลูโลส และส่วนที่มีความต้านทานต่อการย่อยสลาย อาทิ ลิกนิน และโพลีฟีนอลส์ เป็นต้น (Palm et al., 2001) เมื่อเปรียบเทียบระหว่างธาตุอาหารแต่ละชนิดพบว่าเตาเผาทั้งสองแบบสามารถเพิ่มค่า P และ K ได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) เทียบกับมูลสด โดยพบว่ามีเพียง N เท่านั้นที่พบว่าค่าเพิ่มขึ้นในเตาแบบหลุมกลบซึ่งให้เห็นว่า การผลิตถ่านชีวภาพโดยใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 350°C ด้วยเตาแบบดั้งเดิมซึ่งมีรายงานการศึกษาใน Butnan et al. (2015) สามารถลดการสูญเสีย N ลงได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) สำหรับปริมาณ N ที่เพิ่มขึ้นในถ่านชีวภาพมูลสัตว์สามารถอธิบายได้จากสัดส่วนของ C ที่ลดลงจากการสูญเสีย CO_2 จากกระบวนการเผาที่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ N เมื่อเทียบกับเนื้อสารทั้งหมดเปอร์เซ็นต์ P เพิ่มขึ้นในถ่านชีวภาพมูลสัตว์สอง

ชนิดและทั้งสองรูปแบบเตา (Figure 1C, D) สอดคล้องกับรายงานของ Yuan et al. (2014) ที่พบว่า P ในถ่านชีวภาพมูลวัวเพิ่มขึ้น 2.52% เมื่อเทียบกับมูลวัวสด (0.86%) คิดเป็นสัดส่วน 3 เท่าของ P ที่เพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มขึ้นของ P ในถ่านชีวภาพอธิบายได้ด้วยกลไกเดียวกับ N จากการสูญเสีย C ของสารประกอบอินทรีย์จากวัสดุ ตัวอย่างเช่น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน (Cao and Harris, 2010) โดยพบรายงานว่า การเผาถ่านโดยใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 700°C ไม่ส่งผลต่อการสลายตัวของ P (De Luca et al., 2009) ปริมาณของ K ในถ่านชีวภาพมูลวัวและแพะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับมูลสดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) (Figure 1E, F) การเพิ่มขึ้นของ K ในถ่านชีวภาพสอดคล้องกับรายงานของ Zhang et al. (2015) ที่พบว่า การไพโรไลซิสไม้โอ๊ค (Oak) ที่อุณหภูมิ 400°C ส่งผลให้ K เพิ่มขึ้น 192% จากการศึกษาข้างต้นชี้ให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของธาตุอาหารในถ่านชีวภาพมีสาเหตุจากการสูญเสียมวลสารในรูป C เป็นหลัก ค่า pH ของถ่านชีวภาพจากมูลสัตว์ทั้งสองชนิดมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย กรรมวิธี GM biochar (PK) ที่พบว่า pH ลดลงโดยพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) (Table 1) การเพิ่มขึ้นของค่า pH ในถ่านชีวภาพมีสาเหตุจากการเพิ่มขึ้นของไอออนประจุบวกบางตัว (Zhang et al., 2015) โดยเฉพาะ Ca^{2+} และ K^+ ที่พบว่าเมื่อมีการใช้อุณหภูมิของการเผาสูงจะส่งผลให้ pH สูงกว่าการใช้อุณหภูมิต่ำกว่า (Yuan et al., 2011) ค่า pH ที่เพิ่มภายหลังการเผาถ่านไม้ปรากฏในรายงานของ Butnan et al. (2015) ที่พบว่า การเผาถ่านจากยูคาลิปตัส (*Eucalyptus camaldulensis*) ด้วยวิธี Flash Carbonization™ ส่งผลให้ค่า pH เพิ่มขึ้นสูงกว่าการเผาถ่านโดยใช้เตาแบบดั้งเดิม (traditional kiln) ค่า pH ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากธาตุอาหารประจุบวกบางตัวเพิ่มขึ้น อาทิ K^+ Ca^{2+} และ Mg^{2+} (Butnan et al., 2015) สามารถเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดินได้ การศึกษานี้พบว่า ค่า pH ที่เพิ่มขึ้นสัมพันธ์ในทางบวกกับการเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์ P (0.6883, $P < 0.05$) การเพิ่มของ P ที่ตรวจพบในถ่านชีวภาพอาจเกิดจากรูปของ P ที่มีโครงสร้างเสถียรมากขึ้นจากสภาพแวดล้อมที่เป็นด่าง (alkaline) เนื่องจากมีรายงานว่าสภาพ pH ที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ P เกิดเป็นสารประกอบ (complexes) ที่มีหมู่

โลหะในโครงสร้าง ตัวอย่างเช่น Mg-P and Ca-P (Amer et al., 1985 Ngatia et al., 2017) อีกทั้งความร้อนจากการเผาที่ใช้ในการศึกษานี้ก็อยู่ในระดับต่ำที่อาจไม่ส่งผลให้สารประกอบดังกล่าวให้เกิดการสลายตัว อย่างไรก็ตามการศึกษานี้ทำการตรวจวัด P ในรูปของฟอสฟอรัสทั้งหมดซึ่งจำเป็นต้องศึกษาในเชิงลึกของ P ในรูปอื่นต่อไป

ปริมาณ C ที่ออกซิไดส์ได้ง่าย (OC) สูงสุดในกรรมวิธีมูลแพะสด (359.72 g/kg) (Table 1) ค่า OC ลดลงในถ่านชีวภาพมูลสัตว์สองชนิดทั้งในถ่านชีวภาพมูลวัว (148.37 g/kg) และถ่านชีวภาพมูลแพะ (64.159 g/kg) ภายใต้สภาวะการเผาแบบเตาดินเหนียวก่อ (mound kiln, MK) โดยพบว่า C ลดมากที่สุด ในถ่านชีวภาพมูลแพะ คิดเป็น C ที่สูญเสีย 82.2 % เมื่อเทียบกับมูลวัว (44.1%) การนำมูลวัวมาผลิตเป็นถ่านชีวภาพจึงมีแนวโน้มสูญเสีย C สูบรรยากาศค่อนข้างต่ำ สาเหตุสำคัญในการลดลงของ OC เกิดจากการเปลี่ยนรูปของคาร์บอนเป็น CO₂ ภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูงของการเผาถ่าน ในอีกสมมติฐานหนึ่งคือ C บางส่วนมีการจัดเรียงตัวใหม่จากความร้อนและความดันกลายเป็นโครงสร้างแบบแผ่นกราฟีน (graphene) ที่มีความเสถียรเพิ่มขึ้น (Ishimaru et al., 2007) หรือกล่าวได้ว่าการจัดเรียงตัวของ C ที่เป็นระเบียบมากขึ้นอาจส่งผลให้ปริมาณ C ที่ออกซิไดส์ได้ง่ายลดลง การที่มูลสัตว์มี OC สูงมีข้อดีประการหนึ่ง คือ เป็นแหล่ง C ให้กับจุลินทรีย์ดินเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานร่วมกับไนโตรเจน แต่ถ้า C มีปริมาณมากเกินไปจะถูกจุลินทรีย์นำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานมากกว่าการนำไปสะสมในมวลเซลล์ของจุลินทรีย์ส่งผลให้การสะสม C ในดินต่ำ (Puttaso et al., 2011) การใส่ถ่านชีวภาพเพื่อมุ่งเน้นสะสม C ในดินจำเป็นต้องพิจารณาส่วนที่มีความเสถียร (fixed C) เนื่องจากปริมาณของ fixed C มีความสำคัญในแง่การเก็บกัก C ไว้ในดินได้นานขึ้นเนื่องจากมีความเสถียรสูงในธรรมชาติ และนิยมใช้เป็นตัวชี้วัดในการพิจารณาศักยภาพในการเก็บ C ในดิน โดยผลการวิเคราะห์ proximate พบว่าถ่านชีวภาพมูลแพะที่เผาด้วยเตาดินก่อ (GM biochar, MK) ส่งผลให้ปริมาณของ fixed C เพิ่มขึ้นสูงสุด (1.03%) เทียบกับมูลแพะสด (P<0.05) โดยคิดเป็นสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ 77% ขณะที่ถ่านชีวภาพมูลวัวที่เผาด้วยเตาหลุมกลบ (CM biochar, PK) มี fixed C สูงสุดเท่ากับ 1.50% แต่ไม่

พบความแตกต่างทางสถิติเมื่อเทียบกับมูลวัวสด เมื่อพิจารณารูปแบบการเผาพบว่าถ่านชีวภาพมูลสัตว์ทั้ง 2 ชนิดที่เผาด้วยเตาดินเหนียวก่อมีปริมาณสารระเหย (volatile matter, VM) ลดลงมากกว่าเตาหลุมกลบ (Table 1) ซึ่ง VM ดังกล่าวอาจได้แก่ สารระเหยทาร์ (Tar) เป็นต้น โดยพบว่าถ่านชีวภาพมูลวัวที่เผาด้วยเตาดินเหนียวก่อมีปริมาณ VM ที่ลดลงมากกว่าถ่านชีวภาพมูลแพะ (เมื่อเทียบกับมูลสด) มีค่าเท่ากับ 31.7 และ 20.4% ตามลำดับ สอดคล้องกับรายงานของ Antal and Gronli (2003) ที่พบว่าการใช้อุณหภูมิสูงในการเผาถ่านส่งผลให้ปริมาณ VM ตกค้างได้น้อยกว่า ซึ่งนับเป็นข้อดีเนื่องจากสารทาร์ยับยั้งการเจริญเติบโตของพืชได้ (Deenik et al., 2009) ดังนั้นการเลือกถ่านที่มี fixed C สูง แต่มี VM และ OC ต่ำ เพื่อใส่ลงในดินจึงช่วยลดการสลายตัวของ C ได้ดีกว่าถ่านที่มีสมบัติตรงข้าม (Ronsse et al., 2013) โดย Butnan and Vityakon (2017) ระบุว่าถ่านชีวภาพที่เหมาะสมในการปรับปรุงดินควรมี Ash และ VM อยู่ในช่วง 1.6-2.8% และ 20.4-35.8% อย่างไรก็ตามผู้วิจัยไม่ได้ระบุการนำ fixed C มาเป็นเกณฑ์พิจารณาเพื่อการประยุกต์ใช้ ซึ่งงานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่าถ่านชีวภาพมูลแพะเผาด้วยเตาดินก่อสามารถเพิ่มปริมาณ fixed C ได้สูงถึง 77% การผลิตถ่านชีวภาพมูลสัตว์จึงมีข้อดีในแง่ช่วยลดการสลายตัวของมูลสัตว์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติที่ส่งผลต่อการปลดปล่อย CO₂ สูบรรยากาศ เพื่อการสะสม C ในดินได้นานขึ้นโดยการเปลี่ยนให้อยู่ในรูปที่มีความเสถียรเพิ่มขึ้น

รูปของคาร์บอนที่สัมพันธ์กับปริมาณธาตุอาหารและดัชนีการออกของเมล็ด

ถ่านชีวภาพช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชที่ปลูก (Deenik et al., 2008; 2009) โดย Rajkovich et al. (2012) พบว่าการใส่ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากแกนข้าวโพดสามารถเพิ่มผลผลิตฝักข้าวโพดได้ 30% เทียบกับกรรมวิธีควบคุม อย่างไรก็ตามถ่านชีวภาพที่ผลิตได้จะมีลักษณะทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี ปริมาณเถ้า รวมถึงชนิดและปริมาณของสารระเหยแตกต่างกัน (Joseph et al., 2010; Spokas, 2010) สมบัติทางชีววิทยาจึงถูกนำมาใช้เพื่อประเมินสมบัติของถ่านชีวภาพ โดย Buss and Mašek (2014) รายงานว่าวิธีทดสอบการออกของเมล็ด

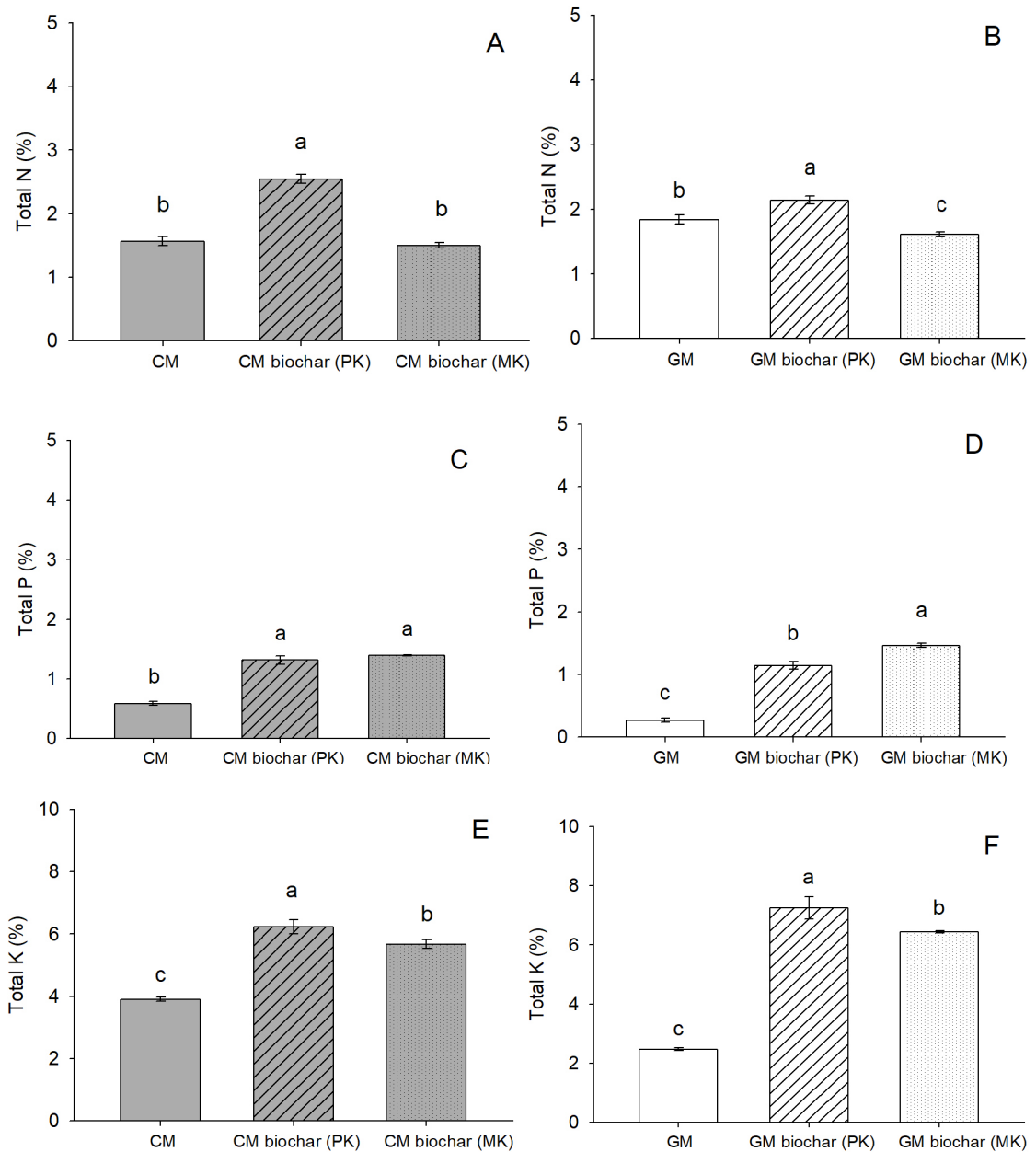


Figure 1 Percent of nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) in cow manure (CM) and CM biochar (gray bars) and goat manure (GM) and GM biochar (white bars). Different letters of each nutrient indicate significant differences at $P < 0.05$ (LSD). Bars represent standard error of the means of three measurements.

(germination index, GI) มีความไวต่อพิษจากถ่านชีวภาพมากที่สุด โดยการศึกษาพบว่า GI สูงสุดในกรรมวิธี GM biochar (PK) มีค่าเท่ากับ 146.94 ขณะที่กรรมวิธี CM biochar (PK) มีค่าเท่ากับ 19.05 ($P < 0.05$) นั่นคือถ่านชีวภาพจากมูลสัตว์ทั้งสองชนิดส่งผลต่อ GI ได้แตกต่างกันถึงแม้จะใช้ระบบการเผาด้วยเตาแบบเดียวกัน ซึ่งอาจมีสาเหตุสำคัญจากวัตถุดิบเริ่มต้นที่ใช้ในการผลิตต่างกัน

นอกจากนี้ปริมาณของ N ที่สูงในกรรมวิธี CM biochar (PK) (Figure 1A) อาจอยู่ในรูป (form) ของ N ต่างๆ ที่ส่งผลต่อ GI ได้เนื่องจากการศึกษานี้พบความสัมพันธ์ในทางลบระหว่าง N กับ GI (-0.5468 , $P < 0.05$) (data not shown) โดย Butnan et al. (2015) รายงานว่า N ที่พบในถ่านชีวภาพยุคาลิปตัส (*E. camaldulensis*) ที่เผาด้วยวิธีแบบดั้งเดิมอยู่ในรูป NH_4^+ และ NO_3^- เท่ากับ 23.96 และ 0.3 mg/kg ตามลำดับ แต่เมื่อนำมาเผาด้วยเตาสัมัยใหม่ (Flash Carbonization™) กลับพบว่า NH_4^+ ลดลงเหลือเพียง 11.87 mg/kg และตรวจไม่พบ NO_3^- การศึกษานี้จึงสมมติฐานได้ว่ารูปของ N อาจเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการออกเมล็ด ขณะเดียวกันก็พบรายงานว่าฟอสฟอรัส (P) มีอิทธิพลต่อการออกเมล็ดและการเจริญเติบโตของพืชเช่นเดียวกัน (De Luca et al., 2009) จึงมีความจำเป็นต้องศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการออกของเมล็ดกับธาตุอาหารตัวอื่นที่พบในถ่านชีวภาพเช่นกัน สารระเหยที่พบในถ่านชีวภาพสามารถส่งผลต่อการงอกและการเจริญเติบโตของพืช (Deenik et al. 2008) โดยสารที่พบปริมาณสูงในถ่านชีวภาพ ได้แก่ ควิโนลีน และนาฟทาลีน (IPCS, 1998) และสารตัวอื่นหลายชนิดที่อยู่ในกลุ่มโพลีไซคลิก อะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) ที่มีสมบัติเป็นพิษต่อพืช (Rogovska et al., 2012) โดยปริมาณและการออกฤทธิ์ขึ้นอยู่กับวิธีที่ใช้ในการเผาถ่าน (IPCS, 1998) การศึกษานี้พบว่าสมบัติทางเคมี ได้แก่ สารระเหย (VM) เถ้า (ash) และ C ที่ออกซีไดส์ได้ง่าย รวมถึงปริมาณธาตุ P และ K ที่

พบในถ่าน ส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์การงอกของเมล็ดข้าวโพด โดยพบว่า VM มีความสัมพันธ์ในทิศทางบวกกับเปอร์เซ็นต์การงอกของเมล็ด (0.6296 , $P < 0.05$) ขณะที่ปริมาณ ash สัมพันธ์ในทางลบกับเปอร์เซ็นต์การงอก (-0.6293 , $P < 0.05$) (Table 2) ผลของสารระเหยต่อพืชมีการศึกษาโดย Deenik et al. (2008) ที่พบว่าถั่วเหลือง [*Glycine max* (L.) Merr.] ที่ปลูกในดินใส่ถ่านชีวภาพ VM สูง (35%) ส่งผลให้การเจริญเติบโตลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) เมื่อเทียบกับกรรมวิธีควบคุม (ดินล้วน) แต่ถ่านที่มี VM ต่ำ (11%) ไม่ส่งผลต่อการเจริญเติบโต อย่างไรก็ตามปริมาณ VM ของถ่านชีวภาพในการศึกษานี้ (52.9 - 81.7%) (Table 1) ซึ่งมีค่าสูงกว่ารายงานของ Deenik et al. (2008) แต่กลับไม่พบส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์การงอกเมล็ด (Table 2) แสดงให้เห็นว่านอกจากปริมาณแล้วปัจจัยการงอกเมล็ดอาจขึ้นอยู่กับชนิดของ VM ที่พบเป็นองค์ประกอบในถ่านชีวภาพ การศึกษานี้พบความสัมพันธ์ระหว่าง C ที่ออกซีไดส์ได้ง่ายกับ fixed C ที่เป็นไปในทิศทางลบ (-0.8036 , $P < 0.001$) (data not shown) บ่งชี้ได้ว่า C ที่ย่อยสลายได้ง่ายที่ลดลงส่งผลต่อการเพิ่มสูงขึ้นของ C ส่วนที่มีความเสถียรจาก Table 2 พบว่าเปอร์เซ็นต์การออกเมล็ดและ GI มีความสัมพันธ์ในทางบวกกับค่า OC แต่กลับไม่พบความสัมพันธ์ใดๆ กับ fixed C จึงมีความเป็นไปได้ว่า C ที่มีความเสถียรแล้วไม่ส่งผลต่อการงอกเมล็ด เมื่อพิจารณาในแง่ของ C ส่วนที่ยังไม่เสถียรอาจเป็นไปได้จากสารประกอบในกลุ่ม PAHs ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ โดยเฉพาะกลุ่มที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ อาทิ นาฟทาลีน และเบนซีน ที่พบว่ามีฤทธิ์ยับยั้งการงอกเมล็ดและการเจริญเติบโตของพืช (Henner et al., 1999; Paradelo et al., 2012) สารระเหยน้ำหนักโมเลกุลต่ำเหล่านี้พบได้ในถ่านชีวภาพที่ผ่านการเผาโดยวิธีไพโรไลซิสแบบช้าที่มีการใช้อุณหภูมิต่ำ ($< 600^\circ\text{C}$) (Zhang et al., 2017) ดังเช่นเตาเผาถ่านแบบดั้งเดิม (Butnan et al., 2015)

Table 1 Some properties of animal manure and its biochar produced under two different local traditional kiln

Treatments	Moisture (%)	pH	Oxidizable organic C (g/kg)	Proximate analysis values (%)			Germination index
				Volatile matter	Ash	Fixed C	
Goat manure (GM)	10.89 b	7.91 d	359.72 a	81.65 a	17.78 d	0.58 c	77.01 b
GM biochar (PK)	5.94 c	7.57 e	315.17 b	76.48 b	22.79 c	0.73 c	146.94 a
GM biochar (MK)	1.98 e	9.16 b	64.159 f	64.98 c	33.99 b	1.03 b	83.74 b
Cow manure (CM)	11.96 a	8.14 c	265.24 c	77.44 ab	21.16 cd	1.40 a	84.84 b
CM biochar (PK)	2.97 d	9.19 b	222.38 d	54.85 d	43.60 a	1.50 a	19.05 c
CM biochar (MK)	2.97 d	9.55 a	148.37 e	52.89 d	45.66 a	1.44 a	95.44 ab
P	***	***	***	***	***	***	**
SED	0.02	0.04	5.29	2.02	2.04	0.11	25.68

PK: pit kiln; MK: mound kiln. SED: Standard error of the three differences. | P |: probability. **, *** significantly different at 0.01 and 0.001 probability levels, respectively. Means with different lowercase letters within a column indicates significance according to LSD

Table 2 Pearson's correlation coefficients (*r*) between biochar properties (pH, organic C, and proximate analysis) and plant nutrients and biological parameters

Parameters	pH Material: H ₂ O = 1: 10	Oxidizable organic C (g/kg)	Proximate analysis value (%)		
			Volatile matter	Ash	Fixed C
Seed germination (%)	-0.6462 **	0.6672 **	0.6296 **	-0.6293 **	-0.4268
Root length (%)	-0.1547	0.4258	0.2179	-0.2140	-0.2593
Germination index (GI)	-0.4396	0.5413 *	0.4249	-0.4225	-0.3517
Total N (%)	-0.1288	-0.3218	-0.1488	0.1530	-0.0245
Total P (%)	0.6883 **	-0.6921 **	-0.7950 ***	0.7985 ***	0.4249
Total K (%)	0.2908	-0.4524	-0.5031 *	0.5071 *	0.2181

*, **, *** significantly different at 0.05, 0.01 and 0.001 probability levels, respectively

สรุปและข้อเสนอแนะ

การผลิตถ่านชีวภาพด้วยรูปแบบที่แตกต่างกันส่งผลต่อองค์ประกอบทางเคมีของถ่านชีวภาพที่ผลิตได้ เตาดินเหนียวก่อ (mound kiln) ส่งผลให้อินทรีคาร์บอนและสารระเหยลดลงมากที่สุด ในถ่านชีวภาพมูลสัตว์ทั้งสองชนิด ขณะเดียวกันก็ส่งผลให้ค่า pH มีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุด ถ่านชีวภาพมูลวัวจากเตาดินเหนียวก่อยังมีค่า fixed C สูงสุดที่แสดงถึงการเปลี่ยนรูปของคาร์บอนที่ออกซิไดส์ได้ง่ายได้มากที่สุด การศึกษานี้จึงพิจารณาว่าถ่านชีวภาพมูลวัวที่ผลิตด้วยเตาดินเหนียวก่อเหมาะสมในการนำมาใส่ลงในดินเพื่อเป้าหมายเก็บกักคาร์บอนในดินได้เป็นระยะเวลายาวนานกว่าถ่านชีวภาพที่มี fixed C ต่ำ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเตาสองแบบต่อปริมาณธาตุอาหารพืชพบว่าถ่านชีวภาพมูลสัตว์ที่ผลิตโดยใช้เตาหลุมกลบส่งเสริมการเพิ่ม total N, และ total K ขณะที่เตาดินเหนียวก่อสามารถเพิ่มธาตุอาหาร total P ได้สูงสุด การศึกษาเพิ่มเติมจึงควรเลือกรูปแบบเตาเผาถ่านให้มีความสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการใช้ให้ได้ถ่านที่มีสมบัติเหมาะสมทั้งการเพิ่มการสะสมคาร์บอนในดินได้มากขึ้นพร้อมทั้งมีสมบัติที่เหมาะสมในการเป็นแหล่งธาตุอาหารพืช

เอกสารอ้างอิง

กรมปศุสัตว์. 2561. ข้อมูลเกษตรกรผู้เลี้ยงแพะ รายเขตปศุสัตว์และรายภาค ปี 2561. แหล่งข้อมูล: <http://ict.dld.go.th>. ค้นเมื่อ 30 มิถุนายน 2562.

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2562. สถานการณ์พลังงานของประเทศไทย มกราคม-พฤษภาคม 2562. แหล่งข้อมูล: http://www.dede.go.th/download/stat62/frontpage_jan_may_62.pdf

โคราช สตาร์ทอัพ. 2561. ชาวนาโคราชหันมาเผาถ่านแบบเผาผีสูตรโบราณขายสร้างรายได้นับหมื่นบาทต่อเดือน. แหล่งข้อมูล: <http://www.koratstartup.com/89005-2/>. ค้นเมื่อ 19 ตุลาคม 2562.

สินธนา แก้วฝายนอก และ ภาณุเดชา กมลมานิทธิ์.

2562. การผลิตถ่านชีวภาพจากมูลแพะด้วยเตาแบบดั้งเดิมเพื่อการเก็บกักคาร์บอนและเพิ่มธาตุอาหารพืช. ใน: ประชุมวิชาการเกษตรนครสวรรค์ ครั้งที่ 16 นวัตกรรมสร้างชาติเกษตรศาสตร์ยั่งยืน 2-3 กรกฎาคม 2562. คณะเกษตรศาสตร์ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนครสวรรค์, พิษณุโลก.

อนุรักษ์ อธิบุญนาค, พัชรินทร์ ตัญญา, พรศิริ เลี้ยงสกุล และ พีระศักดิ์ ศรีนิเวศน์. 2561. การประเมินผลผลิตและชีวมวลในสบู่ดำลูกผสมภายในชนิดและลูกผสมข้ามชนิด. เกษตร. 46: 1191-1202.

ไอเอ็นเอ็น นิวส์. 2561. ชาวนาโคราชหันมาเผาถ่านแบบโบราณรายได้นับหมื่น. แหล่งข้อมูล: https://www.innnews.co.th/regional-news/news_36119/. ค้นเมื่อ 19 ตุลาคม 2562.

Amer, F. A., A. A. Mahmoud, and V. Sabet. 1985. Zeta-potential and surface-area of calcium carbonate as related to phosphate sorption. Soil Sci. Soc. Am. J. 49: 1137-1142.

American Standard of Testing Material. 2007. Standard test method for chemical analysis of wood charcoal. ASTM D 1762-84. ASTM, West Conshohocken, PA.

Antal, M. J. and M. Gronli. 2003. The art, science, and technology of charcoal production. Ind. Eng. Chem. Res. 42: 1619-1640.

Buckman, H.O. and N.C. Brady. 1972. The Nature and Properties of Soils. The Macmillan Company. New York.

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.

- Butnan, S. and P. Vityakon. 2017. Kiln and wood types affecting charcoal quality: Charcoal use as soil amendments in Northeast Thailand. *Khon Kaen Agric. J.* 45: 1315-1321.
- Buss, W. and O. Mašek. 2014. Mobile organic compounds in biochar - A potential source of contamination - phytotoxic effects on cress seed (*Lepidium sativum*) germination. *J. Environ. Manag.* 137: 111-119.
- Cao, X. D., and W. Harris. 2010. Properties of dairy-manure-derived biochar pertinent to its potential use in remediation. *Biores. Technol.* 101: 5222-5228.
- Curtin, D. and J. K. Syers. 1990. Mechanism of sulphate adsorption by two tropical soils. *J. Soil Sci.* 41: 295-304.
- De Luca, T. H., M. D. MacKenzie, and M. J. Gundale. 2009. Biochar effects on soil nutrient transformations. In: J. Lehmann, and S. Joseph (eds.), *Biochar for environmental management: Science and technology*. Earthscan, London.
- Deenik, J. L., G. Uehara, Y. Sumiyoshi, A. Sidibe, A. McClellan, and M. Antal. 2008. Charcoal volatile matter content and its effects on plant growth and biological properties of an infertile tropical soil. In: *Agronomy abstracts*. ASA, Madison, WI.
- Deenik, J. L., A. T. McClellan, and G. Uehara. 2009. Biochar volatile matter content effects on plant growth and nitrogen transformation in a tropical soil. *Western Nutrient Management Conference*. Salt Lake City, Utah, U.S.A.
- Fraser, B. 2010. High-tech charcoal fights climate change. *Environ. Sci. Technol.* 44: 548-549.
- 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.
- International Programme on Chemical Safety (IPCS). 1998. Environmental health criteria. Available: <http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc202.htm#SectionNumber:1.3>. Accessed Aug. 13, 2019.
- Ishimaru, K., T. Hata, P. Bronsveld, and Y. Imamaru. 2007. Microstructural study of carbonized wood after cell wall sectioning. *J. Mater. Sci.* 42: 2662-2668.
- Joseph, S., C. Peacocke, J. Lehmann, and P. Munroe. 2009. Developing a biochar classification and test Methods, pp. 107-126. In: J. Lehmann and S. Joseph (eds), *Biochar for environmental management: science and technology*. Earthscan. London.
- Joseph, S. D., M. Camps-Arbestain, Y. Lin, P. Munroe, C. H. Chia, J. Hook, L. van Zwieten, S. Kimber, A. Cowie, B. P. Singh, J. Lehmann, N. Foidl, R. J. Smernik, and J. E. Amonette. 2010. An investigation into the reactions of biochar in soil. *Aust. J. Soil Res.* 48: 501-515. doi:10.1071/SR10009.
- Kaewpradit, W., and B. Toomsan. 2019. Impact of Eucalyptus biochar application to upland rice-sugarcane cropping systems on enzyme activities and nitrous oxide emissions of soil at sugarcane harvest under incubation experiment. *J. Plant Nutr.* 42: 362-373.
- Khater, E. G. 2015. Some physical and chemical properties of compost. *Int. J. Waste Resources.* 5: 172. doi:10.4172/2252-5211.1000172
- Konaka, T., S. Yabuta, C. Mazereku, Y.

- Kawamitsu, H. Tsujimoto, M. Ueno, and K. Akashi. 2019. Use of carbonized fallen leaves of *Jatropha Curcas* L. as a soil conditioner for acidic and undernourished soil. *Agronomy*. 9: 236. doi:10.3390/agronomy9050236
- Ngatia, L. W., Y. P. Hsieh, D. Nemours, R. Fu, and R. W. Taylor. 2017. Potential phosphorus eutrophication mitigation strategy: Biochar carbon composition, thermal stability and pH influence phosphorus sorption. *Chemosphere*. 180: 201-211.
- Oktiawan, W., B. Zaman, and Purwono. 2018. Use of a germination bioassay to test compost maturity in Tekelan Village. *E3S Web of Conferences* 31, 05012. Doi.org/10.1051/e3sconf/20183105012.
- Olsen, S. R., and L. E. Sommers. 1982. Phosphorus, pp. 403–430. In: A. L., Page et al. (eds.), *Methods of soil analyses. Part 2. Chemical and microbiological properties*. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Palm, C. A., C. N. Gachengo, R. J. Delve, G. Cadisch, and K. E. Giller. 2001. Organic inputs for soil fertility management in tropical agroecosystems: application of an organic resource database. *Agric. Ecosyst. Environ.* 83: 27-42.
- Paradelo, R., R. Devesa-Rey, J. Cancelo-González, R. Basanta, M. T. Pena, F. DíazFierros, and M. T. Barral. 2012. Effect of a compost mulch on seed germination and plant growth in a burnt forest soil from NW Spain. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 12: 73-86.
- Puttaso, A., P. Vityakon, P. Saenjan, V. Trelo-ges, and G. Cadisch. 2011. Relationship between residue quality, decomposition patterns, and soil organic matter accumulation in a tropical sandy soil after 13 years. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 89: 159-174.
- 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. Fertil. Soils.* 48: 271–284.
- Rogovska, N., D. Laird, R. M. Cruse, S. Trabue, and E. Heaton. 2012. Germination Tests for Assessing Biochar Quality. *J. Environ. Qual.* 41: 1–9.
- Ronsse, F., S. van Hecke, D. Dickinson, and W. Prins. 2013. Production and characterization of slow pyrolysis biochar: influence of feedstock type and pyrolysis conditions. *Bioenergy*. 5: 104-115.
- Sohi, S. P., S. E. Loez-Capel, E. Krull, and R. Bol. 2009. Biochar's roles in soil and climate change: A review of research needs. *CSIRO Land Water Sci. Rep.* 5: 17-31.
- Sowunmi, A., J. R. Bastidas-Oyanedel, and J. E. Schmidt. 2015. Carbon Emissions from Livestock Manure in Arid Regions- Technical Study on the United Arab Emirates. *Environ. Nat. Resour. Res.* DOI: 10.5539/enrr.v5n3p1
- Spokas, K. A. 2010. Evaluation of sorbed organics on biochars and potential impacts. In: *Agron. Abstracts*. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI.
- Walkley, A. 1947. A critical examination of a rapid method for determining organic carbon in soils - effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents. *Soil. Sci.* 63: 251-264.
- Yuan, J. H., R. K. Xu, and H. Zhang. 2011. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures. *Biores. Technol.* 102:

- 3488-3497.
- Yuan, L., X. Cao, L. Zhao, X. Xu, and W. Harris. 2014. Phosphorus release from dairy manure, the manure-derived biochar, and their amended soil: effects of phosphorus nature and soil property. *J. Environ. Qual.* 43: 1504-1509.
- Zhang ,T., L. Liu, Z. Song, G. Ren, Y. Feng, X. Han, and G. Yang. 2013. Biogas production by co-digestion of goat manure with three crop residues. *PLoS ONE* 8: e66845.<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0066845>
- Zhang, H., R. P. Voroney, and G. W. Price. 2015. Effects of temperature and processing conditions on biochar chemical properties and their influence on soil C and N transformations. *Soil Biol Biochem.* Doi: 10.1016/j.soilbio.2015.01.006.
- Zhang, X., B. Gao, Y. Zheng, X. Hu, A. E. Creamer, M.D. Annable, and Y. Li. 2017. Biochar for volatile organic compound (VOC) removal: Sorption performance and governing mechanisms. *Biores. Technol.* 245: 606-614.