

อิทธิพลของปุ๋ยหมักถ่านชีวภาพมูลแพะต่อการสะสมคาร์บอนอินทรีย์ในดินและการสร้างเม็ดดิน

Influence of goat manure biochar compost on soil organic carbon accumulation and aggregate formation

ภานุเดชา กมลมานิตย์^{1*} และ พฤกษา หล้าวงษา²

Bhanudacha Kamolmanit^{1*} and Phrueksa Lawongsa²

¹ สาขาวิชาเกษตรศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา 30000

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

² สาขาวิชาปฐพีศาสตร์และสิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 40002

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

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้แบ่งเป็นสองส่วนการศึกษา ส่วนแรกมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติของถ่านชีวภาพมูลแพะและปุ๋ยหมักที่มีส่วนผสมของถ่านชีวภาพมูลแพะ ใช้แผนการทดลอง randomized complete block design (RCBD) กรรมวิธีทดลองประกอบด้วย 1) มูลแพะสด (Goat manure, GM) 2) ถ่านชีวภาพมูลแพะ (Goat manure biochar, GMB) และ 3) ปุ๋ยหมักถ่านชีวภาพมูลแพะ (Goat manure biochar compost, GMBC) ผลการศึกษา พบว่าถ่านชีวภาพมูลแพะมีฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมทั้งหมดสูงสุด (8.10 และ 66.7 g/kg ตามลำดับ) กรรมวิธีเดียวกันนี้มีคาร์บอนรูปที่ย่อยสลายง่าย คาร์บอนคงตัว และเถ้าสูงสุด เท่ากับ 36.53 1.54 และ 45.66% (w/w) ตามลำดับ ($P < 0.05$) ปุ๋ยหมักถ่านชีวภาพมูลแพะมีคาร์บอนรูปที่ย่อยสลายง่ายเท่ากับ 16.59% ต่ำกว่าถ่านมูลแพะอย่างไรก็ตาม C/N ของปุ๋ยหมักชีวภาพมูลแพะ (21.27:1) มีค่าใกล้เคียงกับดินที่ใช้ในการศึกษา (18.7:1) การทดลองส่วนที่สองมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของวัสดุอินทรีย์ต่างชนิดต่อการสะสมคาร์บอนอินทรีย์ในดิน รูปแบบการปลดปล่อย CO₂ การสร้างและการกระจายตัวของขนาดเม็ดดิน วางแผนการทดลองแบบ RCBD กรรมวิธีทดลองประกอบด้วย 1) กรรมวิธีควบคุม (ดิน + ไม้ไผ่วัสดุอินทรีย์, Control) 2) ดิน + มูลแพะ (Soil + GM) 3) ดิน + ถ่านชีวภาพมูลแพะ (Soil + GMB) และ 4) ดิน + ปุ๋ยหมักถ่านชีวภาพมูลแพะ (Soil + GMBC) ผลการศึกษาหลังการบ่มดินเป็นเวลา 6 เดือน พบว่ากรรมวิธี Soil + GMB ส่งผลให้ดินมีคาร์บอนอินทรีย์ (soil organic carbon) สูงสุด (6.5 g/kg, $P < 0.05$) กรรมวิธี Soil + GMBC มีการหายใจสะสมเท่ากับ 86.2 mg CO₂-C/kg soil ซึ่งต่ำกว่า Soil + GM (90.2 mg CO₂-C/kg soil) ขณะที่การหายใจสะสมในกรรมวิธี Soil + GMB มีค่าระหว่าง 0.07-47.07 mg CO₂-C/kg soil ไม่แตกต่างจากกรรมวิธี Control soil (0.06-47.03 mg CO₂-C/kg soil) มีเพียงกรรมวิธีที่มีการใส่วัสดุอินทรีย์ที่ส่งผลให้เส้นผ่านศูนย์กลางน้ำหนักเฉลี่ยเม็ดดินเสถียรน้ำเพิ่มสูงขึ้นหลังการบ่มเป็นเวลา 6 เดือน ($P < 0.05$) กรรมวิธี Soil + GMBC ส่งผลให้ large- และ macro aggregate เพิ่มสูงสุด (0.59 และ 8.52% ตามลำดับ) ในเดือนที่ 6 ($P < 0.05$) การศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าถ่านชีวภาพมูลแพะมีคาร์บอนคงตัวที่เหมาะสมใช้เพื่อการสะสมคาร์บอนอินทรีย์ในดินแต่ C/N ที่สูงอาจส่งผลให้ดินขาดไนโตรเจน ขณะที่ปุ๋ยหมักถ่านชีวภาพมูลแพะมีค่า C/N และ pH ใกล้เคียงกับดินและส่งเสริมการสร้างเม็ดดินขนาดใหญ่

คำสำคัญ: ถ่านชีวภาพมูลแพะ; ปุ๋ยหมัก; เม็ดดิน; การปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์; คาร์บอนอินทรีย์ในดิน

ABSTRACT: This research was divided into two parts. The first part was to study the properties of goat manure biochar and its compost. Experimental design was arranged in randomized complete block design (RCBD) with treatments consisting of 1) Goat manure (GM), 2) Goat manure biochar (GMB), and 3) Goat manure biochar

* Corresponding author: bhanudacha@yahoo.com

compost (GMBC). The results showed that GMB had the highest total phosphorus and potassium (8.10 and 66.7 g/kg, respectively). Based on proximate analysis result, the GMB treatment also had the highest organic C, fixed C, and ash values of 36.53%, 1.54%, and 45.66%, respectively, ($P < 0.05$). The GMBC of 16.59% organic C, which was lower than that of GMB, but C/N ratio of GMBC (21.27:1) was similar to the soil used in the study (18.7:1). The second part of this study was to investigate the influence of different types of organic materials on soil organic C accumulation, patterns of CO_2 release, size-, and distribution of water stable aggregates. Experimental design was arranged in RCBD with treatments consisting of 1) Control soil (no organic material added) 2) Soil + GM 3) Soil + GMB, and 4) Soil + GMBC. Results of six-month incubation study showed that the treatment of Soil + GMB resulted in the highest soil organic carbon (6.5 g/kg, $P < 0.05$). The Soil + GMBC had cumulative respiration of 86.2 mg $\text{CO}_2\text{-C/kg}$ soil which was lower than that of Soil + GM (90.2 mg $\text{CO}_2\text{-C/kg}$ soil) while cumulative respiration in Soil + GMB treatment was 0.07-47.07 mg $\text{CO}_2\text{-C/kg}$ soil, which was not different from that of the control treatment (0.06-47.03 mg $\text{CO}_2\text{-C/kg}$ soil). Only organic material incorporation treatments resulted in a statistically significant increase in mean weight diameter after 6-month soil incubation ($P < 0.05$). Soil + GMBC resulting in increased large- and macro aggregate (0.59 and 8.52%) as compared to the control treatment ($P < 0.05$). The results illustrate that GMB contains high content of fixed C which can be suitable for soil C storage but its high C/N ration may induce N deficiency in the soil, whereas GMBC, having C/N ratio and pH similar to the soil, can promote large water stable aggregate formation.

Keywords: goat manure biochar; compost; soil aggregate; CO_2 emissions; soil organic carbon

บทนำ

การใช้ที่ดินของประเทศไทยเพื่อการเกษตรกรรมถูกใช้เพื่อการปลูกพืชมากกว่า 135 ล้านไร่ (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2562) การใช้ที่ดินอย่างเข้มข้นส่งผลให้อินทรีย์วัตถุในดินลดต่ำลง การสะสมอินทรีย์วัตถุในดินขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบดิน (Samahadthai et al., 2010; Puttaso et al., 2011) ขณะที่เมื่อดินมีผลต่อการสะสมคาร์บอนอินทรีย์ในดินด้านการตรึงทางกายภาพ (Golchin et al., 1994; Six et al., 2000) วัสดุอินทรีย์ที่มีคาร์บอนส่วนที่ต้านทานต่อการย่อยสลาย (recalcitrant C compounds) สูง เช่น ลิกนินส์ และโพลีฟีนอลส์สามารถเพิ่มการสะสมอินทรีย์วัตถุในดิน และส่งเสริมการสร้างเม็ดดินขนาดใหญ่ให้เพิ่มสูงขึ้น (Samahadthai et al., 2010; Puttaso et al., 2011) ในขณะที่การนำวัสดุอินทรีย์ที่มีคาร์บอนย่อยสลายได้ง่าย (easily decomposable C compounds) ใส่ลงในดินกลับส่งผลกระตุ้นการสลายตัวของสารเชื่อม (binding agents) ที่ใช้สร้างเม็ดดินลดลงผ่านกิจกรรมของจุลินทรีย์ดิน (Kuzakov et al., 2000) การใส่วัสดุอินทรีย์ประเภทนี้จึงส่งผลให้การสร้างอินทรีย์วัตถุในดินลดลง ถ่านชีวภาพซึ่งเป็นผลผลิตจากการไพโรไลซิสวัสดุอินทรีย์ผ่านความร้อนและความดันที่ทำให้คาร์บอนคงตัว (fixed C) เพิ่มขึ้นสูง (Domingues et al., 2017) จึงจัดเป็นคาร์บอนที่มีความต้านทานต่อการย่อยสลายอีกรูปหนึ่งที่มีศักยภาพเพิ่มการสะสมอินทรีย์วัตถุในดิน การไพโรไลซิสถ่านชีวภาพที่อุณหภูมิสูงกว่า 350 °C ส่งผลให้เกิดรูพรุนในโครงสร้าง มีการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิว มีหมู่ฟังก์ชัน (functional group) ที่ทำให้มีความสามารถในการดูดซับและแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกกับธาตุตัวอื่นเพิ่มสูงขึ้น (Mia et al., 2017) แนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพของถ่านชีวภาพ ได้แก่ การนำมาใช้เป็นวัสดุผลิตปุ๋ยหมักเพื่อกระตุ้นการย่อยสลายทางชีวภาพโดยการเหนี่ยวนำให้ผลิตเอนไซม์เพื่อย่อยวัสดุหมักได้เพิ่มขึ้น (ณัฐพงษ์ และ ภาณุเดชา, 2562) นอกจากนี้ภาณุเดชา (2562) ยังพบว่าเมื่อนำปุ๋ยหมักถ่านชีวภาพไม่ใส่ลงดินทรายสามารถเพิ่มกิจกรรมของเอนไซม์ในดินได้สูงกว่าการใส่ถ่านชีวภาพเพียงอย่างเดียว จากข้อมูลของกรมปศุสัตว์ (2562) รายงานว่าภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยมีการเลี้ยงแพะมากกว่า 90,000 ตัว นอกจากนี้มูลแพะยังมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบเท่ากับ 18.22% (Zhang et al., 2013) จึงมีความเป็นไปได้ในการนำมาผลิตเป็นถ่านชีวภาพโดยการเปลี่ยนรูปเป็นคาร์บอนรูปที่เสถียรมากขึ้น ดังเห็นได้จากการผลิตถ่านชีวภาพโดยใช้มูลสัตว์ว่าสามารถเพิ่มคาร์บอนคงตัวและธาตุอาหารพืชบางชนิดได้สูงกว่ามูลสัตว์สด (ธนกร และคณะ, 2561; Kiran et al., 2017) ถ่านชีวภาพมูลสัตว์จึงสามารถช่วยเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดินจากการช่วยเพิ่มปริมาณธาตุอาหารในดิน สมมติฐานการศึกษานี้คือการปรับปรุงสมบัติทางเคมีและชีววิทยาของปุ๋ยหมักโดยมีส่วนผสมของถ่านชีวภาพจากมูลสัตว์ร่วมกับการใช้จุลินทรีย์เชื้อเร่งสามารถส่งเสริมการสร้างเม็ดดินและสะสมคาร์บอนในดินได้สูงกว่าการใช้เพียงมูลแพะสดและถ่านชีวภาพล้วน อย่างไรก็ตามการศึกษาอิทธิพลของการใช้ถ่านชีวภาพมูลสัตว์ต่อการสร้างเม็ดดินและสะสมคาร์บอนในดินที่สัมพันธ์กับกิจกรรมของจุลินทรีย์ยังมีค่อนข้างน้อย อีกทั้งการศึกษาร่วมกับวัสดุอินทรีย์ในสภาพควบคุมยังเป็นแนวทาง

ของการใช้วัสดุอินทรีย์เพื่อการปรับปรุงดินที่ให้ข้อมูลสำคัญทั้งด้านการปลดปล่อยธาตุอาหาร การสูญเสียคาร์บอนในรูปคาร์บอนไดออกไซด์ และปริมาณคาร์บอนแยกส่วน งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา 1) สมบัติบางประการของถ่านชีวภาพมูลแพะภายใต้สภาวะการไพโรไลซิสแบบพื้นบ้าน และปุ๋ยหมักที่มีส่วนผสมของถ่านชีวภาพมูลแพะที่ผลิตได้ และ 2) อิทธิพลของวัสดุอินทรีย์ต่างชนิดต่อการสะสมคาร์บอนในดิน รูปแบบการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ การสร้างและการแจกกระจายของขนาดเม็ดดินเสถียรน้ำ รวมถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวชี้วัดที่ทำการตรวจวัด เพื่อช่วยให้เข้าใจกลไกการสะสมคาร์บอนอินทรีย์ในดินและการสร้างเม็ดดินที่จะเป็นตัวชี้วัดคุณภาพของดินได้ดียิ่งขึ้น

วิธีการศึกษา

การผลิตถ่านชีวภาพและปุ๋ยหมักถ่านชีวภาพ

วัสดุอินทรีย์ที่ใช้ในขั้นตอนการผลิตถ่านชีวภาพ และการบ่มดิน (soil incubation) ประกอบด้วย มูลแพะสดจากฟาร์มสำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ. นครราชสีมา ถ่านชีวภาพมูลแพะผลิตโดยการไพโรไลซิสด้วยเตาดินเหนียว (Mound kiln) อุณหภูมิของเตาเผาในลักษณะเดียวกันนี้มีรายงานค่าประมาณ 350 °C (Butnan et al., 2015) ขนาดกว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ 3.5 x 5 x 2 m ช่องปล่อยควันขนาด 15 cm จำนวน 3 ช่อง บรรจุมูลแพะในปี้บสี่เหลี่ยมขนาด 0.25 x 0.25 x 0.35 เมตร จำนวน 4 ปี้บ พื้นที่ช่องว่างภายในเตาเติมเต็มด้วยไม้ยูคาลิปตัส เเผาและอบรวมเวลา 30 วัน ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ปุ๋ยหมักถ่านชีวภาพมูลแพะเตรียมโดยใช้ฟางข้าว มูลแพะสด และถ่านชีวภาพมูลแพะที่คำนวณบนฐานของคาร์บอนอินทรีย์ ไนโตรเจนทั้งหมด และความชื้นของวัสดุอินทรีย์ รายละเอียดโดยย่อ ผสมฟางข้าว มูลแพะสด และถ่านชีวภาพมูลแพะ จำนวน 5, 4.5 และ 0.5 kg (dry weight) คิดเป็นอัตราส่วนถ่านชีวภาพมูลแพะต่อวัสดุอินทรีย์ (ฟางข้าว + มูลแพะ) เท่ากับ 0.05 : 1 (kg: kg dry weight) คิดเป็นน้ำหนักแห้งรวมของวัสดุเท่ากับ 10 kg เติมจุลินทรีย์เชื้อเร่ง พด.1 ในอัตรา 100 g/t ของกองปุ๋ย ทำการหมักเป็นระยะเวลา 49 วัน อ้างอิงตาม ภาณุเดชา และคณะ (2561) ร่อนวัสดุอินทรีย์ทุกชนิดผ่านตะแกรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 mm ก่อนใช้ในการทดลองในสภาพบ่ม

การศึกษากการสะสมอินทรีย์วัตถุและสร้างเม็ดดินในสภาพบ่ม

เก็บตัวอย่างดินจากศูนย์ฝึกรบมและวิจัยทางการเกษตรมหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา ต. ไชยมงคล อ. เมือง จ. นครราชสีมา พิกัด 14°51'18"N 102°04'22"E ที่ระดับความลึก 0-15 cm ค่า pH ของดิน(ดินต่อน้ำ = 1 : 2.5) เท่ากับ 5.4 ค่า C/N ratio เท่ากับ 13.5 เนื้อดินเป็นดินร่วนปนทรายประกอบด้วยอนุภาคขนาดทราย ทรายแป้ง และดินเหนียวในปริมาณเท่ากับ 73.4 13.6 และ 13 % ตามลำดับ ความหนาแน่นดินที่ระดับความลึก 0-15 cm เท่ากับ 1.6 Mg/m³ ร่อนดินและวัสดุอินทรีย์ ได้แก่ มูลแพะสด (goat manure, GM) ถ่านชีวภาพมูลแพะ (goat manure biochar, GMB) ปุ๋ยหมักถ่านชีวภาพมูลแพะ (goat manure biochar compost, GMBC) ผ่านตะแกรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 mm ก่อนใช้ในการทดลอง การศึกษาในสภาพบ่มสร้างหน่วยทดลองจากพลาสติกทรงกระบอกสูง 25 cm เส้นผ่านศูนย์กลาง 8 cm บรรจุดินชั้นล่าง 500 g ความสูง 6 cm ชั้นบนบรรจุดิน 1,000 g ความสูง 12 cm คั่นระหว่างชั้นด้วยกระดาษกรอง ดินชั้นบนผสมวัสดุอินทรีย์แต่ละชนิดในอัตรา 10 t/rai คิดเป็นอัตราของวัสดุอินทรีย์ 1.3% ของดินที่ใช้ในการทดลอง กรรมวิธีทดลองประกอบด้วย 1) กรรมวิธีควบคุม (ดิน + ไม้ใส่วัสดุอินทรีย์, Control) 2) ดิน + มูลแพะ (Soil + GM) 3) ดิน + ถ่านชีวภาพมูลแพะ (Soil + GMB) และ 4) ดิน + ปุ๋ยหมักถ่านชีวภาพมูลแพะ (Soil + GMBC) ปรับความชื้นดินที่ 60% water holding capacity ตลอดระยะเวลาการศึกษา จัดหน่วยทดลองตามแผนการทดลองแบบ randomized complete block design RCBD โดยจัด Block ในทิศทางเดียวกับการไหลเวียนอากาศภายในห้องบ่มและทิศทางของแสง

การวิเคราะห์ดินและวัสดุอินทรีย์

เก็บตัวอย่างดินเพื่อวิเคราะห์เม็ดดินในวันที่ 84 และ 182 (3 และ 6 เดือนหลังการบ่ม) และร่อนดินผ่านตะแกรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm เพื่อวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและชีววิทยาในวันที่ 0, 7, 21, 35, 56, 84, 112, 147 และ 182 วันหลังการบ่ม วิเคราะห์คาร์บอนอินทรีย์โดยวิธีสันดาปเปียก (wet combustion) (Walkley and Black, 1947) ค่า pH โดย pH meter (อัตราส่วนดินต่อน้ำ = 1: 2.5) ความชื้นดินโดยวิธี gravimetric method เพื่อใช้คำนวณร่วมกับตัวชี้วัดอื่นบนฐานน้ำหนักแห้ง ปริมาณ CO₂ โดยวิธีดักจับด้วย 1 M NaOH รายงานค่าการหายใจสะสมของ CO₂-C ที่ปลดปล่อยต่อกิโลกรัมของดินแห้ง (mg CO₂C/kg soil) ไนโตรเจน

ทั้งหมดโดยวิธี micro Kjeldahl ฟอสฟอรัสรูปที่เป็นประโยชน์โดยสกัดด้วยสารละลาย Bray II วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 882 nm (Bray and Kurtz, 1945) โปแทสเซียมที่สกัดได้ด้วย $1\text{ N NH}_4\text{OAc}$ (pH 7.0) วัดความเข้มข้นด้วยเครื่อง Flame spectrophotometer ค่า pH ของถ่านชีวภาพโดย pH meter (วัสดุอินทรีย์ต่อน้ำเท่ากับ 1: 10) ฟอสฟอรัสทั้งหมดและโปแทสเซียมทั้งหมดโดยการย่อยด้วยกรดไนตริก-เปอร์คลอริก สำหรับฟอสฟอรัสพัฒนาสีด้วยสารละลาย vanadomolybdate วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 420 nm (Olsen and Sommers, 1982) สำหรับโปแทสเซียมวิเคราะห์ความเข้มข้นด้วยเครื่อง Atomic absorption spectrophotometer สำหรับการวิเคราะห์ถ่านชีวภาพเพื่อประเมินค่า Proximate ทำตามวิธีมาตรฐาน ASTM 1762-84 (American Standard of Testing Material, 1990) วิเคราะห์ความชื้นโดยอบตัวอย่างที่อุณหภูมิ $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ วิเคราะห์สารระเหย (Volatile matter, VM) โดยเผาที่อุณหภูมิ $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 6 นาที ปริมาณเถ้า (Ash) โดยเผาตัวอย่างที่อุณหภูมิ $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และคำนวณคาร์บอนคงตัว (fixed C) วิเคราะห์เส้นผ่านศูนย์กลางน้ำหนัเฉลี่ย (mean weight diameter, MWD) ของเม็ดดินโดยวิธีร่อนแบบเปียก (wet sieving) เพื่อหาการกระจายตัวขนาดเม็ดดิน โดยชุดตะแกรงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางช่อง ดังนี้ 2, 1, 0.5, 0.25 และ 0.1 mm เขย่าชุดตะแกรงแนวดิ่งในน้ำ 3 เซนติเมตร เวลา 30 นาทีอัตรา 18 ครั้งต่อนาที โดยเครื่อง Daiki 2000 (Daiki Rika Kogyo Co. Ltd.) เก็บตัวอย่างดินแต่ละชั้นและสารแขวนลอย อบที่อุณหภูมิ $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักแล้วคำนวณค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเม็ดดินจากสมการ $MWD\text{ (mm)} = \sum X_i W_i / W$ เมื่อ X_i คือ ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของขนาดเม็ดดิน 1 ใน 5 ขนาดที่ร่อนออกมา (2, 2-1, 1-0.5, 0.5-0.25 และ 0.25-0.106 mm) W_i คือ น้ำหนักแห้งของแต่ละขนาดเม็ดดิน และ W คือ น้ำหนักดินทั้งหมดที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณการแจกกระจายขนาดของเม็ดดิน ดังนี้ large macroaggregate (>2), macroaggregate (2-1 mm), small macroaggregate (1-0.25 mm) และ microaggregate (<0.25 mm) (Ma et al., 2016)

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-Way ANOVA) ตามแผนการทดลองแบบ RCBD เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Least Significant Difference (LSD), standard error of the difference (SED) และ standard error of the mean (SEM) และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างปัจจัยที่ระดับความเชื่อมั่น $P < 0.05$ โดยใช้โปรแกรม Statistix 8.0

ผลการศึกษาและวิจารณ์

สมบัติเบื้องต้นของดินและวัสดุอินทรีย์

ดินที่ใช้ในการศึกษามีคาร์บอนอินทรีย์ในดิน (soil organic carbon, SOC) 2.7 g/kg เทียบเท่าอินทรีย์วัตถุ 0.48% จัดเป็นดินที่มีอินทรีย์วัตถุต่ำมาก คือ $OM < 0.5\%$ ตามเกณฑ์ของกรมพัฒนาที่ดิน (กรมพัฒนาที่ดิน, 2559) ไนโตรเจนทั้งหมด 0.15 g/kg ฟอสฟอรัสรูปที่เป็นประโยชน์ และโปแทสเซียมที่สกัดได้เท่ากับ 5.7 และ 15 mg/kg ตามลำดับ ค่า C/N ของดินเท่ากับ 18.7:1 ผลการศึกษาพบว่า ถ่านชีวภาพที่ผลิตโดยใช้มูลแพะเป็นวัตถุดิบมีค่าคาร์บอนที่ง่ายต่อการย่อยสลาย คาร์บอนคงตัว (fixed C) pH และเถ้า สูงขึ้นกว่ามูลแพะสดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) (Table 1) ถ่านชีวภาพมูลแพะ (Goat manure biochar, GMB) มีปริมาณฟอสฟอรัส และโปแทสเซียม สูงกว่ามูลแพะสด (Goat manure, GM) ($P < 0.05$) แต่มีปริมาณไนโตรเจน และสารระเหย (VM) ต่ำกว่า เมื่อนำถ่านมูลชีวภาพแพะมาเป็นวัสดุผลิตปุ๋ยหมัก (Goat manure biochar compost, GMBC) สามารถปรับค่า C/N ratio เริ่มต้นได้เท่ากับ 30.4 : 1 ภายหลังกระบวนการหมักพบว่าเปอร์เซ็นต์คาร์บอนอินทรีย์ของมูลแพะสดต่ำกว่าถ่านชีวภาพมูลแพะแต่ไม่แตกต่างทางสถิติ เปอร์เซ็นต์ความชื้นของมูลแพะสด ถ่านชีวภาพมูลแพะ และปุ๋ยหมักถ่านชีวภาพมูลแพะมีค่าเท่ากับ 11.8, 2.94 และ 10% ตามลำดับ ขณะที่ค่า C/N มีค่าเท่ากับ 12.5 : 1, 34.14 : 1 และ 21.27 : 1 ตามลำดับ เนื่องจากถ่านชีวภาพมูลแพะมีค่า C/N ที่สูง การใส่ลงในดินโดยตรงอาจทำให้พืชดูดใช้ในโตรเจนได้ลดลงจากกระบวนการ nitrogen immobilization เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโปแทสเซียม และค่า proximate ในปุ๋ยหมักถ่านชีวภาพมูลแพะมีค่าต่ำกว่าถ่านชีวภาพมูลแพะ ยกเว้นสารระเหย (VM) ที่มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ($P < 0.05$) เมื่อพิจารณาสมบัติของวัสดุอินทรีย์ตามเกณฑ์มาตรฐานของกรมวิชาการเกษตร (2548) พบว่ามูลแพะสด และปุ๋ยหมักถ่านชีวภาพมูลแพะมีค่า pH ผ่านเกณฑ์ที่กำหนด (pH ระหว่าง 5.5-8.5) ยกเว้น N ที่ปริมาณต่ำกว่าเกณฑ์ (< 1%) ทั้งนี้เปอร์เซ็นต์อินทรีย์วัตถุ (% OM) ของปุ๋ยหมักถ่านชีวภาพมูลแพะที่มีค่าต่ำกว่าถ่านชีวภาพมูลแพะ (Table 1) อาจเกิดจากวัสดุที่ใช้ในการผลิตปุ๋ย

หมัก คือ ฟางข้าว เป็นวัสดุที่มีเซลลูโลสสูงสามารถกระตุ้นจุลินทรีย์ให้ย่อยสลายแล้วปลดปล่อยออกสู่บรรยากาศในรูปของ CO₂ ได้มากกว่าการเปลี่ยนรูปเป็นคาร์บอนสะสมภายในเซลล์จุลินทรีย์ (Puttaso et al., 2011) จึงเป็นสาเหตุสำคัญที่ % OM มีค่าต่ำในปุ๋ยหมักถ่านชีวภาพมูลแพะ สอดคล้องกับการศึกษาการผลิตปุ๋ยหมักจากถ่านชีวภาพที่มีรายงานโดยภาณุเดชา และคณะ (2561) และณัฐพงษ์ และ ภาณุเดชา (2562) ที่พบว่าเปอร์เซ็นต์อินทรีย์วัตถุที่ลดลงในวัสดุหมักมีความสัมพันธ์ในทางบวกกับปริมาณ CO₂ ที่ถูกปลดปล่อย

การเปลี่ยนแปลงทางเคมีและชีววิทยาภายใต้สภาวะการบ่มดิน

ค่า pH ที่เพิ่มสูงของถ่านชีวภาพ (pH = 10.1)เมื่อเทียบกับมูลแพะสด (pH = 7.48) สามารถเกิดได้จากการมีแร่ธาตุอินทรีย์เพิ่มสูงขึ้น เช่น ฟอสเฟต และจากปริมาณเถ้าที่สร้างตัวขึ้นระหว่างการไพโรไลซิสและคาร์บอนไนเซชัน (Yuan et al., 2011) โดยฟอสฟอรัสทั้งหมด และเถ้าที่วัดได้ในการศึกษาครั้งนี้มีค่าสูง เท่ากับ 8.10 g/kg และ 45.66% ตามลำดับ (Table 1) นอกจากนี้ค่า pH ที่เพิ่มสูงขึ้นในถ่านยังเกิดได้จากการสูญเสียสารระเหย และหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรดบนพื้นผิวของถ่านชีวภาพ (Mukherjee et al., 2011) สมบัติทางเคมีของดินภายหลังการบ่มร่วมกับวัสดุอินทรีย์แสดงไว้ใน Table 2 ผลการศึกษาพบว่ากรรมวิธี Soil + GMB ที่มีการใส่ถ่านชีวภาพมูลแพะในอัตรา 10 ton/rai ส่งผลให้ pH ของดินเพิ่มสูงสุดทั้งในวันที่ 0 และวันที่ 182 หลังการบ่มดิน สอดคล้องกับการศึกษาของ Yuan et al. (2011) ที่พบว่าดินอัลติซอลส์ (Ultisols) ที่ใส่ถ่านชีวภาพต้นถั่วเหลืองสามารถเพิ่มค่า pH ของดินจาก 4.04 เป็น 5.33 โดย Yuan et al. (2011) ได้อภิปรายว่าถ่านชีวภาพที่ผลิตจากวัสดุอินทรีย์ข้างต้นมีสมบัติประจุลบบนพื้นผิว และค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกที่สูง เมื่อใส่ลงในดินส่งผลให้เพิ่มความสามารถของดินในการดูดซับและกักเก็บไอออนประจุบวก อาทิ Ca²⁺ Mg²⁺ K⁺ และ NH₄⁺ ที่ส่งผลให้ค่า pH ของดินเพิ่มสูงขึ้น ดินที่ใช้ในการศึกษานี้อ้างอิงตามระบบนำเสนองแผนดินที่ชุดดิน (กรมพัฒนาที่ดิน, 2559) จัดอยู่ในกลุ่มชุดดินที่ 40 ที่มีรายงานว่าเป็นดินที่มีความเป็นกรดเล็กน้อยจนถึงกรดจัด และความอุดมสมบูรณ์ต่ำ

การวัดการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂-C emissions) ของการศึกษานี้ใช้เพื่อบ่งชี้การหายใจของจุลินทรีย์ในการใช้คาร์บอนเพื่อเป็นแหล่งพลังงานและสร้างชีวมวล ขณะที่การหายใจสะสม (cumulative microbial respiration) แสดงผลรวมของปริมาณ CO₂ ที่ถูกปลดปล่อยโดยรวมตลอดระยะเวลาการย่อยสลายวัสดุอินทรีย์ในดิน กรรมวิธี Soil + GM มีการหายใจสะสมตลอดระยะเวลาของการบ่มสูงสุดเท่ากับ 90.2 mg CO₂-C/kg soil ขณะที่กรรมวิธี Soil + GMBC มีการหายใจสะสมเท่ากับ 86.2 mg CO₂-C/kg soil และยังมีค่าต่ำกว่าการใส่มูลแพะสดทุกช่วงเวลาของการบ่มดิน ขณะที่การหายใจสะสมภายใต้กรรมวิธี Soil + GMB มีค่าระหว่าง 0.07-47.07 mg CO₂-C/kg soil ไม่แตกต่างจากกรรมวิธี Control soil (0.06-47.03 mg CO₂-C/kg soil) (Figure 1) รูปแบบการปลดปล่อย CO₂ แสดงให้เห็นว่าจุลินทรีย์เลือกใช้แหล่งคาร์บอนที่ง่ายในการย่อยสลาย อาจได้แก่ เซลลูโลส (กรรมวิธี Soil + GMBC) ก่อนเลือกใช้คาร์บอนที่ยากต่อการย่อยสลาย อาทิ ลิกนินส์ หรือโพลีฟีนอลส์ (Soil + GM) หรือคาร์บอนคงตัว (Soil + GMB) เป็นต้น เป็นที่น่าสนใจว่ามูลแพะสด และปุ๋ยหมักถ่านชีวภาพมูลแพะ ถึงแม้ว่ามีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนอินทรีย์ที่ต่ำกว่าถ่านมูลแพะ แต่กลับส่งผลให้มีการหายใจสะสมที่สูงกว่า จึงมีความเป็นไปได้ว่าในถ่านชีวภาพอาจมีคาร์บอนส่วนที่ยังเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ภายในโครงสร้างจากอุณหภูมิและความดันที่ใช้ในการไพโรไลซิส เมื่อพิจารณาบริบทของการสร้างเม็ดดินพบว่า การหายใจสะสมที่ต่ำในกรรมวิธี Soil + GMB อาจเกิดจากกลไกการป้องกันถ่านโดยเม็ดดินที่ส่งผลให้จุลินทรีย์เข้าถึงการย่อยสลายถ่านได้ยากขึ้น (Liang et al., 2008) การศึกษานี้ยังพบความสัมพันธ์ทางบวกระหว่าง cumulative CO₂ กับ VM (data not shown) ที่แสดงให้เห็นว่าอาจมีคาร์บอนในรูปอื่น เช่น สารระเหยที่อาจพบในรูปพรุนของถ่านซึ่งจัดเป็นกลไกการดูดซับทางกายภาพของถ่านชีวภาพ (Ahmad et al., 2014) ที่จุลินทรีย์สามารถใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงานได้ ผลการศึกษาข้างต้นสอดคล้องกับรายงานของภาณุเดชา (2562) ที่ระบุว่าเมื่อใส่ถ่านชีวภาพไม่ร่วมในการหมักปุ๋ยสามารถเหนี่ยวนำจุลินทรีย์ให้มีการใช้ประโยชน์จากคาร์บอนได้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นโดยพิจารณาจากรูปแบบการหายใจจำเพาะของจุลินทรีย์ที่คำนวณจากปริมาณ CO₂ ที่ถูกปลดปล่อยต่อมวลชีวภาพจุลินทรีย์คาร์บอน

Table 1 Selected properties of organic materials prior to the incubation experiment

Materials	pH	OC (%)	OM (%)	Plant nutrients (g/kg)			Proximate analysis (%)		
				Total N	Total P	Total K	Fixed C	Ash	VM
GM	7.48 b	15.84 b	27.30 b	12.7 a	3.90 c	39.0 c	1.29 b	21.83 c	76.88 a
GMB	10.1 a	36.53 a	62.97 a	10.7 b	8.10 a	66.7 a	1.54 a	45.66 a	52.79 c
GMBC	7.70 b	16.59 b	28.60 b	7.80 c	5.20 b	45.9 b	0.13 c	35.34 b	64.52 b
P	**	***	***	***	***	***	***	***	***
SED	0.35	0.57	0.98	0.12	0.02	0.11	0.03	1.49	1.48
DOA* (2005)	5.5-8.5		> 30	> 1	-	-	-	-	-

GM: Goat manure; GMB: Goat manure biochar; GMBC: Goat manure biochar compost. VM: volatile matter.

SED: Standard error of the three differences. **, *** significantly different at P<0.01 and 0.001, respectively.

*DOA: Department of Agriculture. Means within the same column with different letters are significantly different at P<0.05 (LSD)

Table 2 Soil properties and CO₂-C emissions as affected by different organic materials

Treatment	Parameters					
	pH		SOC (g/kg)		CO ₂ -C emissions (mg CO ₂ -C/kg soil/day)	
	day 0	day 182	day 0	day 182	day 0	day 182
Control soil	5.82 b	6.07 c	2.7 c	2.5 b	0.97 c	0.06 b
Soil + Goat manure	6.79 a	6.45 bc	4.7 ab	3.9 b	2.22 a	0.09 b
Soil + Goat manure biochar	6.82 a	7.20 a	6.5 a	6.4 a	1.08 c	0.06 b
Soil + Goat manure biochar compost	6.79 a	6.88 ab	4.8 bc	4.0 b	1.72 b	0.28 a
P	***	**	*	*	***	*
SED	0.02	0.22	0.07	0.08	0.12	0.07

SOC: soil organic carbon. *, **, *** Significantly different at P<0.05, 0.01 and 0.001, respectively.

SED: Standard error of the three differences. Data followed by the different letter are significantly different at P<0.05

อิทธิพลของวัสดุอินทรีย์ต่อการแจกกระจายของขนาดเม็ดดิน

การแจกกระจายของขนาดเม็ดดินแสดงดัง **Table 3** เส้นผ่านศูนย์กลางน้ำหนัเฉลี่ยเม็ดดิน (MWD) หลังการบ่มดินเป็นระยะเวลา 3 เดือน มีค่าระหว่าง 0.09-0.13 mm และหลังการบ่มดินเป็นเวลา 6 เดือนพบว่า MWD มีค่าระหว่าง 0.11-0.23 mm เฉพาะกรรมวิธีที่มีการใส่วัสดุอินทรีย์ส่งผลให้ MWD เพิ่มขึ้นหลังการบ่มเป็นเวลา 6 เดือนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05) (**Figure 2**) ทั้งนี้ MWD ขนาด < 0.5 mm ในดินที่ใช้ในการศึกษาที่พบในปริมาณต่ำบ่งชี้ว่า ปริมาณอนุภาคดินเหนียวที่ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อม (cementing agent) อนุภาคเม็ดดินมีปริมาณน้อย นอกจากนี้ปัจจัยที่ส่งผลให้ MWD โดยรวมมีค่าเฉลี่ยที่ต่ำ เกิดได้จากการร่อนดินผ่านตะแกรง (Ø 2 mm) ก่อนใช้ในการทดลอง ภายหลัง 3 เดือนของการบ่มดินร่วมกับวัสดุอินทรีย์พบว่ากรรมวิธี Soil + GM ส่งผลให้เม็ดดินขนาด 2-1 mm เพิ่มขึ้นสูงสุด (4.96 % w/w) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05) (**Table 3**) ภายหลัง 6 เดือนของการบ่มดินพบว่ากรรมวิธี Soil + GMBC ส่งผลให้เม็ดดินทั้งขนาด >2 mm และ 2-1 mm เพิ่มขึ้นสูงสุด (0.59 และ 8.52 % w/w, ตามลำดับ) ขณะที่กรรมวิธี Soil + GM ส่งผลให้เม็ดดินขนาด 1-0.5 mm เพิ่มขึ้นสูงสุด (9.44 %w/w) ในเดือนที่ 6 ของการบ่ม เป็นที่น่าสนใจว่าดินที่ใส่ถ่านชีวภาพมูลแพะ (Soil + GMB) ให้ผลที่แตกต่างจากวัสดุอินทรีย์ชนิดอื่น โดยส่งผลให้มีการสร้างเม็ดดินขนาด 0.5-0.25 mm ได้มากที่สุด

(27.01 % w/w) ดินที่ใส่ถ่านมูลแพะจึงมีลักษณะกลไกการสร้างเม็ดดินที่อาจเป็นไปได้ตามทฤษฎีลำดับชั้น (hierarchical theory) ของการเกิดเม็ดดินที่ระบุไว้โดย Tisdall and Oades (1982) ว่าอนุภาคดินสามารถถูกเชื่อมเข้าด้วยกันโดยสารเชื่อมทำให้เกิดเป็นเม็ดดินขนาดเล็กขึ้น ขณะที่ดินที่ใส่มูลแพะสดและปุ๋ยหมักถ่านชีวภาพมูลแพะมีลักษณะการสร้างเม็ดดินขนาดใหญ่ก่อน ซึ่งสอดคล้องกับกลไกที่ว่าเม็ดดินขนาดใหญ่สามารถถูกสร้างผ่านการสะสมของเม็ดดินขนาดเล็กซึ่งอาจอยู่รอบๆ อินทรีย์วัตถุส่วนที่ยังมีลักษณะเป็นชิ้น (particulate organic matter) หรือแกนแบคทีเรีย (bacterial cores) (Bronick and Lal, 2005) ดินที่ใส่ปุ๋ยหมักถ่านชีวภาพมูลแพะอาจมีเส้นใยของเชื้อราในการสร้างเม็ดดินขนาดใหญ่อย่างหลวม ๆ ขึ้นได้จากเม็ดดินขนาดเล็กและอนุภาคของสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์-อนินทรีย์ (Kumar and Goh, 2000; Christensen, 2001) สมมติฐานนี้ตั้งข้อสังเกตได้จากการใส่ปุ๋ยหมักถ่านชีวภาพมูลแพะแล้วส่งผลให้เม็ดดินขนาดใหญ่เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากจุลินทรีย์หลายชนิดในปุ๋ยหมักเนื่องจากการใช้เชื้อเร่ง พด. 1 ในการย่อยสลาย อาทิ *Chaetomium thermophilum*, *Bacillus subtilis* และ *Streptomyces* sp. เป็นต้น (กรมพัฒนาที่ดิน, 2550) เนื่องจากจุลินทรีย์เหล่านี้สามารถสร้างเส้นใยหรือปลดปล่อยโพลีแซคคาไรด์ระหว่างการย่อยสลายวัสดุอินทรีย์ โดย *Streptomyces* sp. และ *Chaetomium* sp. นอกจากมีความสามารถย่อยสลายเซลลูโลสแล้ว ยังมีบทบาทในการสร้างเม็ดดิน โดยการยึดอนุภาคดินให้เกิดเป็นเม็ดดินที่มีขนาดใหญ่ขึ้น (Costa et al., 2018; Matei et al., 2020) คุณลักษณะของจุลินทรีย์ดังกล่าวจึงส่งผลให้ดินที่บ่มร่วมกับปุ๋ยหมักจากถ่านชีวภาพมูลแพะมีเม็ดดินขนาด >2 mm และ 2-1 mm เพิ่มสูงสุด (0.59 และ 8.52% w/w ตามลำดับ) การศึกษาในลักษณะเดียวกันนี้จึงควรวิเคราะห์มวลชีวภาพจุลินทรีย์ที่สัมพันธ์กับการสร้างเม็ดดินเพื่อให้เข้าใจกลไกชัดเจนมากขึ้น ผลการศึกษานี้ยังพบว่า SOC มีความสัมพันธ์ในทางบวกกับเม็ดดินขนาด 0.5-0.25 mm ทั้งในเดือนที่ 3 และ 6 หลังการบ่มดิน (Table 4) ซึ่งให้เห็นว่าในดินร่วนปนทรายที่มีปริมาณอนุภาคทรายสูงที่ใช้ในการศึกษานี้ เม็ดดินขนาดเล็ก (0.5-0.25 mm) ทำหน้าที่เป็นแหล่งกักเก็บคาร์บอนไว้ได้มากที่สุด ซึ่งอาจเป็นแหล่งสะสมคาร์บอนในดินในระยะยาวต่อไปที่จำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติม ในขณะที่เม็ดดินขนาดใหญ่อาจเป็นแหล่งของการกักเก็บคาร์บอนที่บทบาทน้อยกว่าในดินประเภทนี้

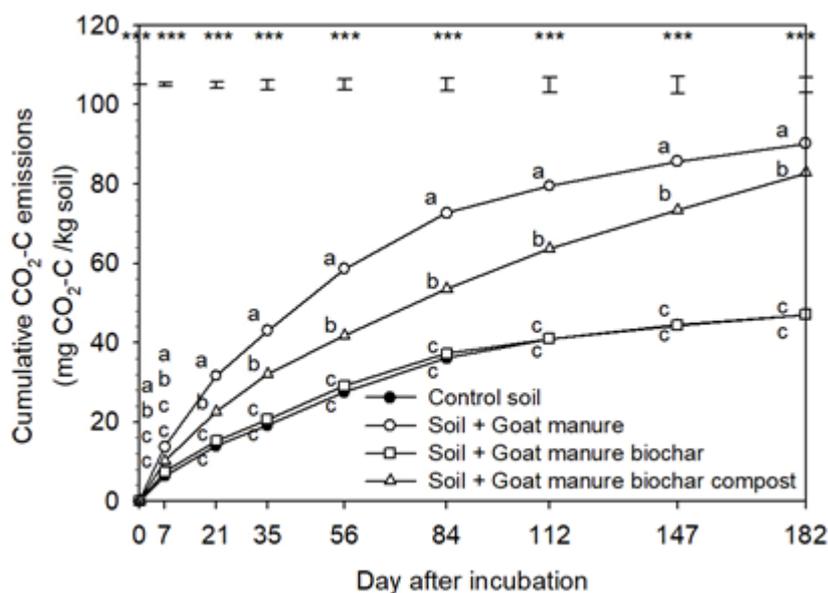


Figure 1 Cumulative CO₂-C emissions (mg CO₂-C /kg soil) in soil amended with different organic materials application. *** significantly different at P<0.001

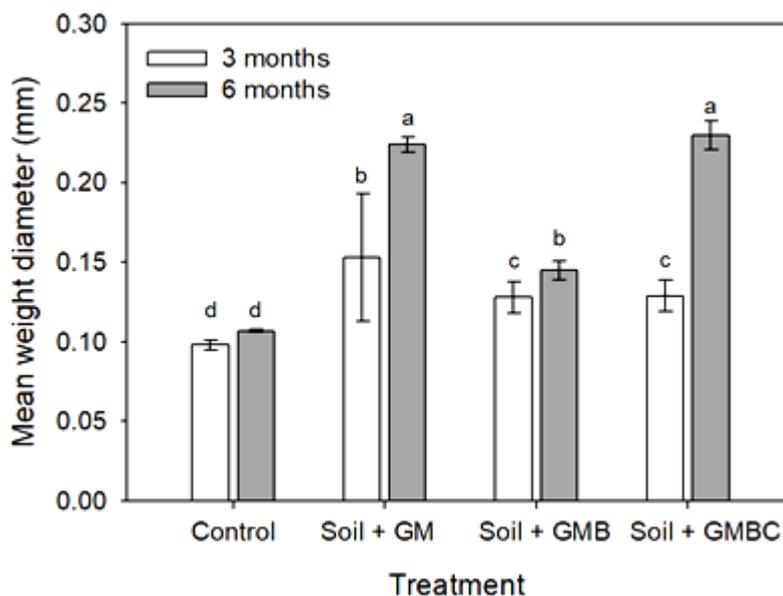


Figure 2 Mean weight diameter of soil aggregates as affected by different organic materials under incubation condition. Different letters indicate significant differences at $P < 0.05$ (LSD). Bars represent the standard error of means (SEM) of three measurements

Table 3 Soil aggregate size fractions as affected by different organic materials incorporation.

Treatments	Aggregate size class (% w/w)					
	Large	Macro	Small		Micro	
	(>2 mm)	(2-1 mm)	(1-0.5 mm)	(0.5-0.25 mm)	(0.25-0.106 mm)	(<0.106 mm)
	3 months					
Control soil	nd	0.21 c	4.48 b	13.66	37.75	43.91
Soil + GM	nd	4.96 a	5.58 ab	17.41	30.01	42.04
Soil + GMB	nd	0.48 c	7.21 a	20.49	34.28	37.54
Soil + GMBC	nd	2.69 b	4.12 b	19.86	30.23	43.10
P	-	***	*	ns	ns	ns
SED	-	0.48	0.81	2.35	3.15	3.39
	6 months					
Control soil	0.11 b	0.21 b	4.94 b	14.33 c	40.08 a	40.33 a
Soil + GM	0.27 b	8.15 a	9.44 a	20.38 b	36.68 b	25.08 c
Soil + GMB	0.19 b	0.39 b	5.63 b	27.01 a	39.41 a	27.37 b
Soil + GMBC	0.59 a	8.52 a	9.24 a	19.76 b	36.65 b	25.24 c
P	*	***	***	***	**	***
SED	0.13	0.39	0.34	0.41	0.56	0.25

GM: Goat manure; GMB: Goat manure biochar; GMBC: Goat manure biochar compost.

SED: Standard error of the three differences. *, **, *** Significantly different at $P < 0.05$, 0.01 and 0.001, respectively.

ns: not significantly different. nd: not detected. Means followed by the different letter are significantly different at $P < 0.05$.

Table 4 Correlations between SOC and different sizes of soil aggregate.

Soil parameter	Correlation coefficients (r)					
	>2 mm	2-1 mm	1-0.5 mm	0.5-0.25 mm	0.25-0.106 mm	<0.106 mm
SOC (after 3 months)	nd	-0.0477	0.5553	0.6672 *	-0.2062	-0.5405
SOC (after 6 months)	0.1622	-0.1136	-0.0327	0.8507 ***	0.0137	0.0717

SOC: soil organic carbon (%). nd: not detected. *, *** significantly different at P<0.05 and P<0.001, respectively

สรุป

มูลแพะมีศักยภาพในการใช้ผลิตเป็นถ่านชีวภาพ ผลผลิตที่ได้คือถ่านที่มี pH และคาร์บอนคงตัวเพิ่มสูงขึ้น ธาตุอาหารหลักพืช ได้แก่ ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมปริมาณเพิ่มสูงขึ้น การศึกษาการบ่มดินร่วมกับวัสดุอินทรีย์ในสภาพควบคุมพบว่าเมื่อนำถ่านชีวภาพมูลแพะมาใช้เป็นวัสดุร่วมในการผลิตปุ๋ยหมัก สามารถปรับค่า C/N ให้ใกล้เคียงกับดิน มีค่า pH และอินทรีย์วัตถุในระดับที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ ปุ๋ยหมักถ่านชีวภาพมูลแพะยังลดการปลดปล่อย CO₂ สะสมสู่บรรยากาศได้ต่ำกว่ามูลแพะสดอย่างมีนัยสำคัญในทุกช่วงการทดลอง อีกทั้งเมื่อนำปุ๋ยหมักถ่านชีวภาพมูลแพะมาบ่มร่วมกับดินสามารถเพิ่มเม็ดดินขนาด >2 mm และ 2-1 mm ได้สูงสุด ดังนั้นการใช้ถ่านชีวภาพมูลแพะเพื่อเป็นส่วนผสมในการผลิตปุ๋ยหมักร่วมกับการใช้จุลินทรีย์เชื้อเร่งจึงเป็นการปรับปรุงสมบัติทางเคมีและชีววิทยาของวัสดุอินทรีย์ เมื่อใส่ลงในดินสามารถส่งเสริมการสะสมคาร์บอนในดินและสร้างเม็ดดินขนาดใหญ่เพิ่มขึ้นได้ ขณะที่เม็ดดินขนาด 0.5-0.25 mm มีความสัมพันธ์ในทางบวกกับปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในดิน เม็ดดินขนาดเล็กเหล่านี้จึงอาจทำหน้าที่เป็นแหล่งกักเก็บคาร์บอนไว้ได้มากที่สุดที่จะเป็นแหล่งสะสมคาร์บอนในดินในระยะยาวต่อไป การศึกษานี้ยังเป็นแนวทางในการปรับปรุงและคัดเลือกวัสดุอินทรีย์ที่เหมาะสมในการใส่ลงในดินเพื่อเป้าหมายเพิ่มการสะสมคาร์บอนอินทรีย์ในดิน เพิ่มการปลดปล่อยธาตุอาหารพืช และลดการสูญเสียคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศ ที่สามารถนำไปปรับใช้สำหรับพื้นที่ทางการเกษตรที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำและมีการใช้ที่ดินอย่างเข้มข้นได้

เอกสารอ้างอิง

กรมปศุสัตว์. 2562. ข้อมูลเกษตรกรผู้เลี้ยงแพะ รายเขตปศุสัตว์และรายภาค ปี 2562. แหล่งข้อมูล: <http://ict.dld.go.th>. ค้นเมื่อ 25 ธันวาคม 2563.

กรมพัฒนาที่ดิน. 2550. การผลิตปุ๋ยหมักโดยใช้สารเร่ง ชูปเปอร์ พด.1 เอกสารทางวิชาการเผยแพร่. แหล่งข้อมูล: www.ldd.go.th/menu_Dataonline/G1/G1_13.pdf. ค้นเมื่อ 10 ธันวาคม 2562.

กรมพัฒนาที่ดิน. 2559. ระบบนำเสนอแผนที่ชุดดิน (Soil Series) มาตรฐาน 1:25,000. ระบบสืบค้นและให้บริการแผนที่ online. แหล่งข้อมูล: <https://goo.gl/vKVp4E>. ค้นเมื่อ 25 สิงหาคม 2563.

กรมวิชาการเกษตร. 2548. ประกาศกรมวิชาการเกษตร เรื่อง มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ พ.ศ. 2548. ราชกิจจานุเบกษา. เล่ม 122 ตอนพิเศษ 109 ง., หน้า 9-10.

ณัฐพงษ์ พานวงษ์ และภานุเดชา กมลมานิย์. 2562. การประเมินคุณภาพและความสมบูรณ์ของปุ๋ยหมักถ่านชีวภาพจากรูปแบบกิจกรรมของเอนไซม์หมุนเวียนคาร์บอนและการปลดปล่อย CO₂-C. แก่นเกษตร. 47: 199-210.

ธนกร วรวงศ์, นิยมสุข ณ ไทร และปานชีวัน ปอนพังกา. 2561. คุณภาพปุ๋ยหมักมูลม้าที่เสริมด้วยถ่านชีวภาพต่างชนิด. แก่นเกษตร. 46 (ฉบับพิเศษ 1): 1175-1180.

ภานุเดชา กมลมานิย์. 2562. การปรับปรุงคุณภาพวัสดุอินทรีย์เพื่อลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) สู่บรรยากาศและส่งเสริมการสะสมคาร์บอนในดินร่วนปนทรายอินทรีย์วัตถุต่ำ. แก่นเกษตร. 47: 865-876.

ภานุเดชา กมลมานิย์, ณัฐพงษ์ พานวงษ์ และพุกษา หล้าวงษา. 2561. อิทธิพลของอัตราส่วนถ่านชีวภาพต่อฟางข้าวร่วมกับมูลแพะต่อคุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และชีววิทยาของปุ๋ยหมัก. แก่นเกษตร. 46: 843-856.

- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2562. ข้อมูลเศรษฐกิจการเกษตร. แหล่งข้อมูล: <http://oae.go.th/assets/portals/1/files/socio/LandUtilization2562.pdf>. ค้นเมื่อ 30 กันยายน 2563.
- Ahmad, M., A. U. Rajapaksha., J. E. Lim, and Y. S. Ok. 2014. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review. *Chemosphere*. 99: 19-33.
- American Standard of Testing Material. 1990. Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal ASTM D 1762-84.
- Bray, R. H., and L. T. Kurtz. 1945. Determination of total organic and available form of phosphorus in soil. *Soil Science*. 59: 39-45.
- Bronick, C. J., and R. Lal. 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma*. 124: 3-22.
- 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.
- Costa, O. Y. A., J. M. Raaijmakers, and E. E. Kuramae. 2018. Microbial extracellular polymeric substances: ecological function and impact on soil aggregation. *Frontiers in Microbiology*. 9: 1636.
- Christensen, B. T. 2001. Physical Fractionation of Soil and Structural and Functional Complexity in Organic Matter Turnover. *European Journal of Soil Science*. 52: 345-353.
- Domingues, R. R., P. F. Trugilho, C. A. Silva, I. C. N. A. de Melo, L. C. A. Melo, Z. M. Magriotis, and M. A. Sánchez-Monedero. 2017. Properties of biochar derived from wood and high-nutrient biomasses with the aim of agronomic and environmental benefits. *PLoS ONE*. 12(5): e0176884.
- Golchin, A., J. Oades, J. Skjemstad, and P. Clarke. 1994. Study of free and occluded particulate organic-matter in soils by solid-state C-13 Cp/mass NMR-spectroscopy and scanning electron-microscopy. *Australian Journal of Soil Research*. 32: 285-309.
- Kiran, Y. K., A. Barkat, X. Cui, Y. Feng, F. Pan, L. Tang, and X. Yang. 2017. Cow manure and cow manure derived biochar application as a soil amendment for reducing cadmium availability and accumulation by *Brassica chinensis* L. in acidic red soil. *Journal of Integrative Agriculture*. 16: 725-734.
- Kumar, K., and K. M. Goh. 2000. Crop residues and management practices: effects on soil quality, soil nitrogen dynamics, crop yields, and nitrogen recovery. *Advances in Agronomy*. 68: 197-319.
- Kuzyakov, Y., J. K. Friedel, and K. Stahr. 2000. Review of mechanisms and quantification of priming effect. *Soil Biology and Biochemistry*. 32: 1485-1498.
- Liang, B., J. Lehmann, D. Solomon, S. Soshi, J. E. Thies, J. O. Skjemstad, F. J. Luizao, M. H. Engelhard, E. G. Neves, and S. Wirick. 2008. Stability of biomass-derived black carbon in soils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 72: 6069-6078.
- Ma, N., L. Zhang, Y. Zhang, L. Yang, C. Yu, G. Yin, T. A. Doane, Z. Wu, P. Zhu, 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.
- Matei, G. M., S. Matei and V. Mocanu. 2020. Assessing the role of soil microbial communities of natural forest ecosystem. *EuroBiotech Journal*. 4(1): 01-07.

- Mia, S., B. Singh, and F. A. Dijkstra. 2017. Aged biochar affects gross nitrogen mineralization and recovery; A 15 N study in two contrasting soils. *Global Change Biology Bioenergy*. 9: 1196-1206.
- Mukherjee, A., A. R. Zimmerman, and W. Harris. 2011. Surface chemistry variations among a series of laboratory-produced biochars. *Geoderma*. 163: 247-255.
- Olsen, S. R., and L. E. Sommers. 1982. Phosphorus. P. 403-430. In: A.L., Page et al., eds, *Methods of soil analyses. Part 2. Chemical and microbiological properties*. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin.
- 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. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 89: 159-174.
- Samahadthai, P., P. Vityakon, and P. Saenjan. 2010. Effect of different quality plant residues on soil carbon accumulation and aggregate formation in a tropical sandy soil in Northeast Thailand as revealed by a 10-year field experiment. *Land Degradation and Development*. 21: 463-473.
- Six, J., K. Paustian, E. T. Elliott, and C. Combrink. 2000. Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon. *Soil Science Society of America Journal*. 64: 681-689.
- Tisdall, J. M., and J. M. Oades. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *European Journal of Soil Science*. 33: 141-163.
- Walkley, A., and I. A. Black. 1947. Chromic acid titration method for determination of soil organic matter. *Soil Science Society of America Proceedings*. 63: 251-257.
- Yuan, J. H., R. K. Xu, and H. Zhang. 2011. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures. *Bioresource Technology*. 102: 3488-3497.
- 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(6): e66845.