

อิทธิพลของอัตราส่วนถ่านชีวภาพต่อฟางข้าวร่วมกับมูลแพะต่อสมบัติ ทางกายภาพ เคมี และชีววิทยาของปุ๋ยหมัก

Influence of biochar to rice straw ratio combined with goat manure on physico-chemical and biological characteristics of compost

ภาณุเดชา กมลมานิตย์^{1*}, ณัฐพงษ์ พานวงษ์¹ และ พฤกษา หล้าวงษา²

Bhanudacha Kamolmanit^{1*}, Nattapong Panwong¹ and Phruksa Lawongsa²

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนฟางข้าวต่อถ่านชีวภาพร่วมกับมูลแพะต่อกระบวนการหมักปุ๋ยอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเริ่มต้นของกองปุ๋ยเท่ากับ 30 : 1 วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ในบล็อก (Randomized Complete Block Design, RCBD) ประกอบด้วย 4 กรรมวิธีทดลอง ได้แก่ 1) ฟางข้าว + มูลแพะ ซึ่งเป็นกรรมวิธีควบคุม 2) ถ่านชีวภาพต่อฟางข้าว (0.5 : 1) + มูลแพะ 3) ถ่านชีวภาพ : ฟางข้าว (1 : 1) + มูลแพะ และ 4) ถ่านชีวภาพ : ฟางข้าว (1.5 : 1) + มูลแพะ ผลจากการศึกษาพบว่าไนโตรเจนทั้งหมดเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการหมักในทุกกรรมวิธีทดลอง เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่ากรรมวิธีฟางข้าว+มูลแพะ มีปริมาณไนโตรเจนสูงสุด (10.5 g kg⁻¹, P<0.05) ขณะที่กรรมวิธีถ่านชีวภาพต่อฟางข้าว (1 : 1) + มูลแพะ มีการหายใจสะสมสูงสุด มีค่าเท่ากับ (1135.4 mg CO₂-C kg⁻¹ compost) ในกรรมวิธีเดียวกันนี้พบว่ามีช่วงระยะอุณหภูมิสูง (thermophilic stage) นานที่สุด (> 44°C, 14 days) ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนลดลงต่ำสุด (186.25 g kg⁻¹) มีค่า pH เข้าใกล้ความเป็นกลางมากที่สุด (7.96) และเปอร์เซ็นต์การคงเหลือของเถ้าภายหลังการหมักไม่แตกต่างจากกรรมวิธีควบคุมชี้ให้เห็นว่าการใส่ถ่านชีวภาพร่วมกับฟางข้าวในอัตรา 1 : 1 เหมาะสมในการนำมาใช้เป็นส่วนผสมเริ่มต้นในการหมักปุ๋ยร่วมกับมูลแพะ

คำสำคัญ : ปุ๋ยหมัก, ถ่านชีวภาพ, การหายใจ, อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน, ซุปเปอร์ พด.1

ABSTRACT: This research investigated the composting process of rice straw (RS) and goat manure (GM) at initial C/N ratio of 30:1, and the effect of various rates of biochars (BC) produced by traditional kiln, on composting process. The experiment was arranged in Randomized Complete Block Design (RCBD) and divided into 4 treatments include the following: 1) control (rice straw: RS + goat manure: GM), 2) BC: RS (0.5 : 1) + GM, 3), and 4) BC: RS (1.5 : 1) + GM. Total N increased slightly in all composting piles. Meanwhile, at the end of composting, treatment of RS + GM contained highest total N content (10.5 g kg⁻¹, P<0.05). Cumulative respiration (1135.4 mg CO₂-C kg⁻¹ compost) from treatment of BC: RS (1 : 1) + GM was highest than that of other treatments (P<0.05). Our results pointed out that compost with an initial C: N ratio of 30: 1

¹ หลักสูตรเกษตรศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา 30000

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

² สาขาวิชาปฐพีศาสตร์และสิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002

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

* Corresponding author: bhanudacha@yahoo.com

seeded with microbial activator of BC: RS (1 : 1) + GM showed the longest thermophilic stage ($> 44^{\circ}\text{C}$, 14 days), the lowest organic carbon (186.25 g kg^{-1}), and the pH neutral to reach maturity (7.96), and no different in the changes of percentage of ash content to the control, suggesting a suitable initial formula.

Keywords: compost, biochar, respiration, carbon-to-nitrogen ratio, microbial activator

บทนำ

ปัจจุบันถ่านชีวภาพ (biochar) ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในการนำมาใช้เพื่อปรับปรุงดินเพื่อเพิ่มผลผลิตพืช เนื่องจากถ่านชีวภาพเป็นแหล่งของไอออนธาตุอาหารพืชที่สำคัญหลายตัว อาทิ Ca^{2+} , Mg^{2+} , และ Na^+ เป็นต้น (Major et al., 2010) ไอออนเหล่านี้สามารถถูกปลดปล่อยจากถ่านชีวภาพสู่สารละลายดินที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Butnan et al., 2015) งานวิจัยที่ศึกษาการใช้ประโยชน์จากถ่านชีวภาพเพื่อการเกษตรจึงมีเพิ่มสูงขึ้น โดยส่วนใหญ่มุ่งเน้นเพื่อเพิ่มพูนความอุดมสมบูรณ์ของดินในแง่การเพิ่มธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อพืช (Chan et al., 2008; Gaskin et al., 2010; Hass et al., 2012; Herath et al., 2013) อย่างไรก็ตามถ่านชีวภาพยังมีสมบัติทางกายภาพและเคมีที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบและสภาวะที่ใช้ในกระบวนการเผา (Antal and Gronli, 2003) ถ่านชีวภาพที่ผลิตภายใต้อุณหภูมิและความดันสูงมักมีปริมาณสารที่ระเหยได้ (volatile matter) ต่ำ แต่มีปริมาณคาร์บอนเสถียร (fixed C) และเถ้า (ash) ที่สูง ซึ่งแตกต่างจากถ่านชีวภาพที่ผลิตภายใต้อุณหภูมิต่ำกว่าซึ่งจะมีองค์ประกอบข้างต้นในทิศทางที่ตรงกันข้าม (Deenik et al., 2011) การใส่ถ่านชีวภาพที่ผลิตภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่ำเหล่านี้จึงมีประโยชน์ต่อพืช เนื่องจากส่งผลให้ธาตุอาหารหลักและรองของพืชในดินมีสูงขึ้น (Butnan et al., 2015) และยังช่วยปรับปรุงดินทางด้านกายภาพและเคมี เช่น การสร้างตัวของเม็ดดิน (Brodowski et al., 2005; Brodowski et al., 2006), กักเก็บคาร์บอนรูปที่เสถียรไว้ในดิน (Chan et al., 2008; Novak et al.,

2009) เป็นต้น ถ่านชีวภาพจึงมีประโยชน์ในการเพิ่มความอุดมสมบูรณ์และปรับปรุงโครงสร้างดินได้ในเวลาเดียวกัน (Deenik et al., 2011; Gaskin, 2008; Hemmes and Schmidt, 2009) ถ่านชีวภาพในประเทศไทยที่ผลิตด้วยอุณหภูมิต่ำ ($< 350^{\circ}\text{C}$) มักพบในการผลิตโดยวิธีแบบดั้งเดิม (traditional kiln) (Butnan et al., 2016) อาทิเช่น การเผาโดยใช้เตาดินเหนียวปั้น อิฐก่อ หรือดินกลบ เป็นต้น ในกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพด้วยวิธีดั้งเดิมอาจก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ในรูปแบบหนึ่งจากวิธีการเผาถ่านที่เรียกว่า ถ่านกรอบ ซึ่งจัดเป็นถ่านชีวภาพส่วนที่เปราะและแตกหักง่ายหลุดออกจากส่วนของถ่านชีวภาพที่ยังคงความเป็นชิ้น เป็นผลพลอยได้จากขั้นตอนการร่อนถ่านชีวภาพสุกผ่านตะแกรงคัดแยกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 ซม. ปริมาณของถ่านชีวภาพกรอบที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิตมีจำนวนมากจึงเป็นวัสดุที่มีความเป็นไปได้ในการนำมาใช้เป็นส่วนผสมเริ่มต้นในการผลิตปุ๋ยหมัก เนื่องจากสมบัติทางกายภาพของถ่านชีวภาพที่มีความพรุนสูง เมื่อคลุกเคล้าร่วมกับวัสดุหมักจึงช่วยลดความหนาแน่นของกองปุ๋ย ส่วนสมบัติทางด้านเคมีได้แก่ ช่วยรักษาระดับ pH ให้เหมาะสม เพิ่มธาตุอาหารพืชที่สำคัญ เช่น Ca Mg และ K เป็นต้น (Major et al., 2010; Zhang et al., 2016) และบทบาทที่สำคัญด้านชีวภาพ คือ การเป็นที่อยู่อาศัยและแหล่งอาหารของจุลินทรีย์ในกองปุ๋ย เนื่องจากมีการศึกษาที่พบว่าถ่านชีวภาพช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะในการดูดซับและส่งเสริมการเข้าย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ (Trupiano et al., 2017) ถ่านชีวภาพยังช่วยดูดซับก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมัก (Camps, 2015) จึงมีส่วนสำคัญในการลดการสูญเสียไนโตรเจนระหว่าง

กระบวนการหมักปุ๋ยได้ทางหนึ่ง อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่เป็นแนวทางการศึกษาการใช้ประโยชน์จากถ่านชีวภาพเพื่อนำมาเพิ่มคุณภาพและมูลค่าของปุ๋ยหมักในประเทศไทยยังมีอยู่ค่อนข้างน้อย แต่ปัจจุบันพบว่าได้รับการศึกษาเพิ่มมากขึ้นในต่างประเทศ (Steiner et al., 2010; Steiner et al., 2011) อย่างไรก็ตามสมบัติของถ่านชีวภาพที่ใช้เป็นวัสดุเริ่มต้นในการหมักมีความแตกต่างกันในแง่ขององค์ประกอบทางเคมี ซึ่งเกิดได้จากขนาดของวัตถุดิบเริ่มต้นที่ใช้เผา อุณหภูมิ การเผา ระยะเวลาการบ่ม เป็นต้น (Chaiwong and Siripomakarachai, 2016) ที่อาจเป็นสาเหตุสำคัญที่ส่งผลต่อกระบวนการย่อยสลายระหว่างการหมักมีความแปรผัน และส่งผลต่อเนื่องถึงสมบัติบางประการและระยะเวลาของการหมักปุ๋ย งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของถ่านชีวภาพต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของกายภาพ เคมี และชีววิทยาที่เกิดขึ้นระหว่างการหมักปุ๋ยฟางข้าวร่วมกับมูลแพะ สมบัติเริ่มต้นบางประการของวัสดุหมัก รวมถึงสหสัมพันธ์ (correlations) ระหว่างตัวแปรต่างๆ เพื่อให้เข้าใจกระบวนการหมักที่เกิดขึ้นโดยจุลินทรีย์ และเพื่อให้ได้สูตรเริ่มต้นของวัสดุหมักที่เหมาะสมในการผลิตปุ๋ยและนำผลผลิตที่ได้เพื่อไปประยุกต์ใช้ต่อไป

วิธีการศึกษา

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ถ่านชีวภาพที่ใช้ในการศึกษาผลิตจากไม้ผสมชนิดและสัดส่วนของไม้ที่ใช้โดยประมาณ มีดังนี้ สะเดา (*Azadirachta indica*) 40% กระถินพิมาน (*Acacia tomentosa*) 15% จำปา (*Samanea saman*) 15% เต็ง (*Shorea roxburghii*) 10% รัง (*Shorea siamensis*) 10% ประดู่ (*Pterocarpus macrocarpus*) 5% และมะค่าแต้ (*Sindora siamensis* Miq.) 5% เเผาโดยใช้เตาดินปั้นขนาดเฉลี่ย กว้าง x ยาว x ลึก เท่ากับ 3 ม. x 3 ม. x 1.8 ม. ณ บ้านทัพวัง ต.เมืองนาท อ.ขามสะแกแสง จ.นครราชสีมา ใช้ระยะเวลาใน

การเผา 12 วัน และอบหลังการเผา 30 วัน ถ่านชีวภาพที่กรอบคืดแยกได้โดยการร่อนผ่านตะแกรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 ซม. จากนั้นนำมาบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มม. เพื่อใช้ในการทดลองต่อไป ฟางข้าวที่ใช้ในการทดลองเป็นวัสดุเหลือจากการเก็บเกี่ยวข้าวหอมมะลิ กข 15 นำมาตัดให้มีมีความยาว 3 ซม. มูลแพะได้จากฟาร์มเกษตรสำนักงานเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ. นครราชสีมา สมบัติบางประการของถ่านชีวภาพ ฟางข้าว และมูลแพะที่ใช้ในการศึกษาแสดงดัง **Table 1** การทดลองประกอบด้วย 4 กรรมวิธีทดลอง ดังนี้ กรรมวิธีที่ 1 ประกอบด้วยฟางข้าว + มูลแพะ (w/w) ในอัตราส่วนฟางข้าวต่อมูลแพะ 1 : 0.43 ขณะที่กรรมวิธีที่ 2, 3, และ 4 ผสมถ่านชีวภาพ (biochar, BC) ต่อฟางข้าว (rice straw, RS) ในอัตราส่วน 0.5 : 1, 1 : 1, และ 1.5 : 1 (kg : kg dry weight) ร่วมกับมูลแพะ (goat manure, GM) โดยกรรมวิธีที่ 1, 2, 3 และ 4 ใช้มูลแพะปริมาณ 7.0, 6.2, 5.8 และ 5.4 kg dry weight ตามลำดับ (**Table 2**) ทุกกรรมวิธีคำนวณและผสมวัสดุหมักให้ได้อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C : N ratio) เริ่มต้นเท่ากับ 30 : 1 หมักปุ๋ยโดยผสมวัสดุหมักให้เป็นเนื้อเดียวกันแล้วสุ่มเก็บตัวอย่างเพื่อนำมาหาความชื้นและเติมน้ำกลั่นเพื่อปรับความชื้นให้ได้ 60% นับเป็นวันที่ 0 (3 ชั่วโมงหลังการหมัก) และหยุดปรับความชื้นกองปุ๋ยเมื่ออุณหภูมิอยู่ระยะบ่ม (curing stage) เป็นเวลา 2 สัปดาห์ขึ้นไป และหมักเป็นระยะเวลา 49 วัน (Kamolmanit and Reungsang, 2006) ทุกกรรมวิธีทดลองมีการเติมจุลินทรีย์เชื้อเร่ง (ซูเปอร์ พด.1) ในอัตรา $100 \text{ g} \cdot \text{ton compost pile}^{-1}$ (กรมพัฒนาที่ดิน, 2550) โดยละลายในน้ำที่ใช้ในการปรับความชื้นเริ่มต้นของการหมัก ทุกกรรมวิธีประกอบด้วย 3 ขั้นตอนการทดลอง วางแผนการทดลองแบบ Randomized Complete Block Design (RCBD) โดยจัด Block ให้มีทิศทางขวางทิศทางของแสง รายละเอียดของหน่วยทดลองและการวางแผนการทดลองแสดงดัง **Table 2**

Table 1 Some physical and chemical properties of raw materials used for the composting mixtures

Parameters	Biochar	Rice straw	Goat manure
Moisture content (% by weight)	28.2	9.6	33.8
pH (materials : water = 1 : 10)	6.8	5.9	8.06
Organic carbon (g kg ⁻¹) ¹	100	567	250
Total N (g kg ⁻¹)	1.0	6.3	15.5
C : N ratio	100	90	16.13
Ash content (%)	55.9	47.3	24.2

¹ Wet-digestion method with K₂Cr₂O₇.

Table 2 Experimental set-up

Treatments	Raw materials (kg dry weight)			Initial C : N ratio		BC : RS ratio (kg : kg)	Total weight (kg)
	BC	RS	GM	Theoretical	Practical		
RS + GM	-	3.0	7.0	30.32	30.97 ± 0.89	-	10.0
(0.5BC:1RS)+GM	1.3	2.5	6.2	30.47	30.39 ± 0.35	0.5 : 1	10.0
(1BC:1RS)+GM	2.2	2.2	5.8	30.50	29.58 ± 0.40	1 : 1	10.2
(1.5BC:1RS)+GM	2.8	1.8	5.4	29.81	29.72 ± 0.86	1.5 : 1	10.0

BC : biochar. RS : rice straw. GM : goat manure. ± represents standard error of the means of three measurements.

การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์

วัตถุประสงค์ของกองปุ๋ยวันเว้นวันตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง เก็บตัวอย่างปุ๋ย 5 จุด จากแต่ละหน่วยทดลอง ในวันที่ 0 (3 ชั่วโมงหลังการหมัก), 3, 5, 7, 14, 21, 28, 35, 42 และ 49 วันหลังการหมัก (day after composting) เพื่อวิเคราะห์ที่วัดได้แก่ 1) pH (วัดอุณหภูมิที่เท่ากับ 1 : 10) 2) อินทรีย์คาร์บอนที่ออกซิไดซ์ได้ด้วยไดโครเมต โดยวิธี wet digestion (Walkley and Black, 1934) 3) ไนโตรเจนทั้งหมด (Total N) โดยวิธี micro kjeldahl 4) ปริมาณเถ้าทั้งหมด (550 °C, 5 hr) (Tiquia et al., 2000) 5) การหายใจ (respiration) โดยวิธี alkaline (1 N NaOH) trapped method (Anderson, 1982) รายงานค่าพื้นฐานของ CO₂-C ที่ปลดปล่อยต่อกิโลกรัมของน้ำหนักปุ๋ยแห้งต่อวัน 6) ความชื้นโดยวิธี gravimetric method คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นเพื่อใช้ในการคำนวณร่วมกับตัวชี้ที่ 1-5 บนฐานน้ำหนักวัสดุหมัก/ปุ๋ยแห้ง

การวิเคราะห์ทางสถิติ

วิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-Way Anova) ตามแผนการทดลองแบบ Randomized Complete Block Design (RCBD) เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างกรรมวิธีทดลองโดยใช้วิธี Least Significant Difference (LSD) และค่า Standard Error of Difference (SED) รวมถึงวิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์ (correlation) ระหว่างปัจจัยโดยใช้โปรแกรม Statistix, version 8.0 (Analytical software, 2003) เพื่อใช้สำหรับการอธิบายผลการทดลองและนำไปสู่การวิเคราะห์อภิปรายผล และสรุปผลการทดลอง

ผลการศึกษาและวิจารณ์

สมบัติเริ่มต้นบางประการของวัสดุหมัก

ถ่านชีวภาพที่ใช้ในการทดลองมีค่า pH เท่ากับ 6.8 ซึ่งมีค่าเป็นกลางจนถึงกรดเล็กน้อย โดยถ่านชีวภาพที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นไม้ผสมที่พบได้ใน

เขตร้อนซึ่งส่วนใหญ่เป็นไม้เนื้อแข็ง ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับรายงานของ Jindo et al. (2014) ที่รายงานว่าถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้เนื้อแข็ง เช่น ไม้ไผ่ และเผาด้วยอุณหภูมิ 400 °C มีค่า pH เท่ากับ 6.43 อย่างไรก็ตามในการศึกษาในเชิงลึกต่อไปจึงควรวิเคราะห์ค่า pH เริ่มต้นของถ่านชีวภาพที่ผลิตได้จากไม้แต่ละชนิด ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนที่ออกซิไดส์ได้ด้วยไดโครเมตซึ่งจัดเป็นรูปของคาร์บอนที่ย่อยสลายได้ง่ายที่พบในถ่านชีวภาพมีค่าเท่ากับ 100 g kg⁻¹ (Table 1) ซึ่งพบว่ามีความต่ำกว่าในรายงานบางการศึกษา อาทิ Dias et al. (2010) ที่รายงานว่าอินทรีย์คาร์บอนที่ออกซิไดส์ด้วยไดโครเมตในถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้ยูคาลิปตัสมีค่าเท่ากับ 497.8 g kg⁻¹ อย่างไรก็ตามค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของคณะผู้วิจัยข้างต้น (C: N ratio เท่ากับ 82.1) และในการศึกษานี้ (C: N ratio เท่ากับ 100) พบว่ามีค่าเริ่มต้นที่ใกล้เคียงกัน ฟางข้าวที่ใช้ในการทดลองมีค่า pH เท่ากับ 5.9 ซึ่งมีสมบัติค่อนข้างเป็นกรด ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในฟางข้าวมีค่าเท่ากับ 567 g kg⁻¹ ขณะเดียวกัน Puttaso et al. (2011) ได้รายงานว่าฟางข้าวมีปริมาณเซลลูโลสเท่ากับ 507 g kg⁻¹ จึงเป็นที่น่าสนใจว่าคาร์บอนที่ย่อยสลายได้ง่ายที่พบในฟางข้าวเกือบทั้งหมดอยู่ในรูปของเซลลูโลส

การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีระหว่างกระบวนการหมัก

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของปุ๋ยแบ่งได้ 4 ช่วง คือ 1) ช่วงอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วโดยสูงกว่า 20 °C ที่เกิดขึ้นภายใน 3 วันของการหมัก (day after composting), 2) ช่วงเวลาที่อุณหภูมิสูงกว่า 44 °C (ประมาณ 4 วันหลังการหมัก) 3) ช่วงการลดของอุณหภูมิ (ประมาณ 3 วันหลังการหมัก) และ 4) ช่วงอุณหภูมิคงที่ (ประมาณ 21 วันหลังการหมัก) โดยพบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยทุกกรรมวิธีลดต่ำลงจนมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิภายนอกกองปุ๋ยกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง (ประมาณ 45 วันหลังการหมัก) กรรมวิธีควบคุม (RS+GM) มีค่าอุณหภูมิสูงสุดในช่วงแรก (1-9 วันหลังการหมัก) อย่างมีนัยสำคัญแตกต่างทาง

สถิติ (P<0.05) (Figure 1A) อุณหภูมิที่สูงในกรรมวิธีดังกล่าวเกิดจากการที่ฟางข้าว ซึ่งมีคาร์บอนที่ออกซิไดส์ได้ง่าย (567 g kg⁻¹) มีอยู่ในกรรมวิธี RS+GM ในปริมาณสูงสุด คือ 3 kg เมื่อเทียบกับกรรมวิธีอื่น (Table 2) โดยคาร์บอนประเภทนี้จัดเป็นส่วนที่ย่อยสลายได้ง่าย (easily decomposable C compounds) (Kamolmanit et al., 2013) ที่ส่งผลให้จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายได้อย่างรวดเร็วเพื่อนำมาใช้เป็นพลังงาน ขณะที่กรรมวิธีที่ 3 คือ (1BC : 1RS) + GM มีอุณหภูมิเพิ่มสูงสุดในวันที่ 11-23 หลังการหมักอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05) (Figure 1A) นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิของกองปุ๋ยในกรรมวิธีเดียวกันนี้สามารถรักษาระดับความร้อนของอุณหภูมิในระยะ thermophilic stage ได้นานสุด คือ 14 วัน เมื่อเทียบกับกรรมวิธีควบคุม (RS+GM) คือ 10 วัน ซึ่งให้เห็นว่าจุลินทรีย์ในกองปุ๋ยสามารถปรับตัวใช้คาร์บอนส่วนที่ย่อยสลายได้ง่ายที่พบถ่านชีวภาพภายหลังจากส่วนที่พบในฟางข้าวหมดลง และเป็นที่น่าสนใจว่าอุณหภูมิที่ขึ้นจุดสูงสุดของปุ๋ยที่มีส่วนผสมของถ่านชีวภาพในทุกกรรมวิธีมีค่าต่ำกว่ากรรมวิธีควบคุม (ไม่มีการใส่ถ่านชีวภาพ) การศึกษานี้ยังพบความสัมพันธ์ (correlation) ระหว่างอุณหภูมิและการหายใจที่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน (0.5409, P<0.05) (Table 3) ที่แสดงให้เห็นว่าการหายใจที่เพิ่มขึ้นโดยจุลินทรีย์ระหว่างการย่อยสลายสารอินทรีย์มีอิทธิพลต่อการเพิ่มของอุณหภูมิในกองปุ๋ยให้สูงขึ้นได้ การปลดปล่อย CO₂ จึงควรนำมาพิจารณาใช้เป็นตัวชี้วัดสำคัญของเกณฑ์ปุ๋ยหมักในประเทศไทย เช่นเดียวกับการวัดอุณหภูมิ ถึงแม้ว่าในการศึกษานี้พบว่ารูปแบบ (pattern) การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่างกันระหว่างการหมักมีความแตกต่างจากรายงานของ Camps (2015) ที่ได้สรุปว่าปุ๋ยหมักที่มีส่วนผสมของถ่านชีวภาพนั้นมีอุณหภูมิของช่วง thermophilic stage สูงกว่าและมีช่วงเวลาที่ยาวนานกว่าปุ๋ยสูตรปกติที่ไม่มีส่วนผสมของถ่านชีวภาพ แต่อย่างไรก็ตามคณะผู้วิจัยพบว่ากรรมวิธี (1BC: 1RS) + GM มีช่วง thermophilic stage ที่ยาวนานกว่ากรรมวิธีควบคุมและขณะเดียวกันการลดลงของ

อุณหภูมิในระยะ curing stage ระหว่าง 2 กรรมวิธี เกิดขึ้นใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาตัวชี้วัดด้านอุณหภูมิ จึงพบว่าปุ๋ยที่มีส่วนผสมของถ่านชีวภาพในอัตราส่วน 1 : 1 จึงมีความเป็นไปได้ในการนำไปใช้โดยไม่มี ความแตกต่างในแง่ของระยะเวลาของการสิ้นสุดการหมัก เมื่อเทียบกับปุ๋ยสูตรปกติ

ค่า pH เริ่มต้นของปุ๋ยหมักในทุกกรรมวิธีมีค่า ระหว่าง 7.59-7.77 ในวันที่ 0 (3 ชั่วโมงหลังการหมัก) และเพิ่มสูงขึ้นในระยะเวลา 7 วันหลังการหมัก (8.46-8.87) (Figure 1B) การศึกษานี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Dias et al. (2010) ที่พบว่าระหว่าง กระบวนการหมักปุ๋ยจากถ่านชีวภาพ + มูลสัตว์ปีก มีค่า pH เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการหมัก ซึ่ง การเพิ่มขึ้นของค่า pH ของกองปุ๋ยมีสาเหตุหลักจาก การเพิ่มขึ้นของแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4^+) จากกระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน (Huang et al., 2004; Kamolmanit and Reungsang, 2006) อย่างไรก็ตามในการศึกษานี้ยังพบแนวโน้มการลดลงของ pH

ภายหลังจาก 14 วันของการหมัก สาเหตุของการลดต่ำลงของ pH ส่วนหนึ่งเกิดจากการสูญเสียไนโตรเจน ในรูปของแอมโมเนีย (NH_3) เมื่อพิจารณาค่าความชื้นของปุ๋ยหมัก (moisture content) ในช่วง 35 วันแรกของการหมักมีค่าอยู่ระหว่าง 62.6-54.5% และมีแนวโน้มลดลงจนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง (Figure 1C) สาเหตุสำคัญของการลดลงของความชื้นอย่างรวดเร็ว เนื่องมาจากการหยุดการปรับความชื้นของกองปุ๋ย กรรมวิธี RS + GM มีความชื้นสูงสุดวันที่ 5, 7 และ 11 ของการหมัก มีค่าเท่ากับ 60.5, 59.7 และ 55.7 ($P < 0.05$) สอดคล้องกับอุณหภูมิที่สูงสุดในกรรมวิธี ดังกล่าวในช่วงเวลาเดียวกันของการหมัก ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับการหายใจที่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน (0.5288 , $P < 0.001$) ซึ่งให้เห็นว่าระหว่างกระบวนการหมักปุ๋ยนั้นส่งผลต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ในการย่อยสลายและปลดปล่อยออกมากใน รูปแบบของการหายใจที่เพิ่มสูงขึ้น

Table 3 Pearson correlation coefficients (*r*) relating between each variable

Variable	Correlation coefficients						
	Organic C	Total N	Temperature	Respiration	pH	Moisture	C : N ratio
Organic C		0.2147	0.2289	0.3521	-0.1433	0.1864	0.5208***
Total N			-0.3294	-0.5891***	-0.4408	-0.1319	-0.7030***
Temperature				0.5409***	0.5733***	0.3513	0.5104***
Respiration					0.5415***	0.5288***	0.7637***
pH						0.2293	0.3384
Moisture							0.2357
C : N ratio							

*** Significant at the 0.001 probability level.

Table 4 Relative changes of percentage of ash content

No.	Treatments	Ash content (%)		% changes of ash content
		Initial	Final	
1	RS + GM	21.94 ± 0.47 ^c	28.79 ± 1.48 ^c	23.6
2	(0.5BC: 1RS) + GM	26.9 ± 0.65 ^b	35.26 ± 0.49 ^b	23.6
3	(1BC: 1RS) + GM	27.9 ± 2.77 ^b	35.97 ± 0.39 ^b	22.5
4	(1.5BC: 1RS) + GM	35.9 ± 1.21 ^a	40.71 ± 2.11 ^a	11.4
	P-value	0.0001	0.0002	0.06
	SED	1.19	1.06	ns
	CV (%)	5.2	3.7	24.7

BC: biochar. RS: rice straw. GM: goat manure. |*p*|: probability. SED: standard error of the difference. ± standard error of the means of three measurements. ns: not significantly different. Means within the same row with different letters are significantly different at $P < 0.05$.

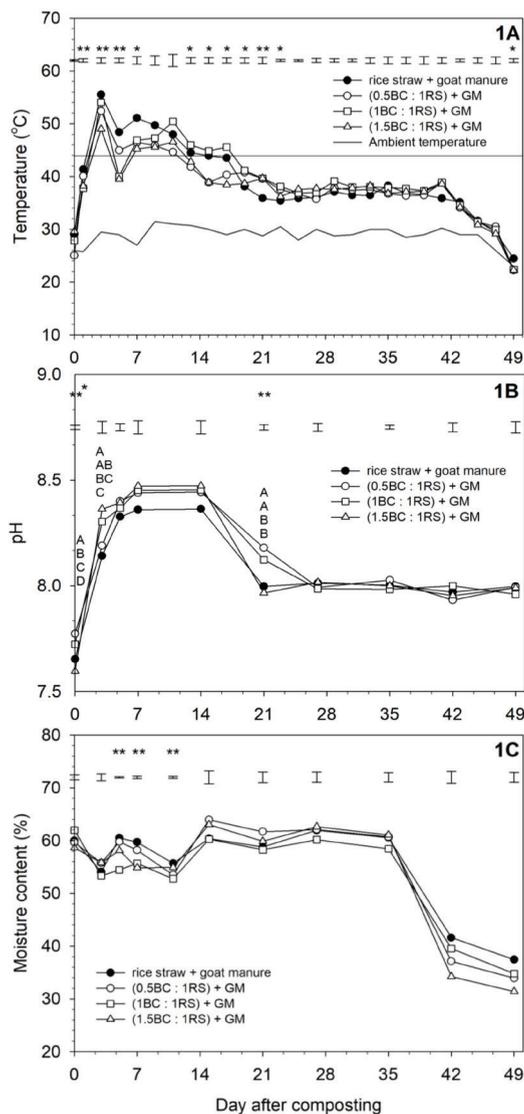


Figure 1 Temporal pattern of temperature (A), pH (B), and moisture content (C) during composting. At each sampling date, data with different letters are significantly different at $P < 0.05$ (LSD). Vertical bars represent standard error of the difference (SED)

การเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนและไนโตรเจนตามช่วงเวลา

รูปแบบของการเปลี่ยนแปลงปริมาณอินทรีย์คาร์บอนมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการหมักที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามพบว่าปริมาณอินทรีย์คาร์บอนของทุกกรรมวิธีลดลงเพิ่มขึ้นในวันที่ 3 ของการหมักในการทดลองนี้พบว่าเปอร์เซ็นต์อินทรีย์คาร์บอนมี

ค่าสูงในช่วง 3 วันแรกของการหมักในแต่ละกรรมวิธีตามลำดับดังนี้ $RS + GM > (0.5BC : 1RS) + GM > (1BC : 1RS) + GM > (1.5BC : 1RS) + GM$ มีค่าเท่ากับ 262.25, 244.25, 231.0 และ 206.6 ($g\ kg^{-1}$) ($P < 0.05$) (Figure 3A) ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนที่ลดลงตามเวลาที่แตกต่างกันในแต่ละกรรมวิธีแสดงให้เห็นว่าจุลินทรีย์มีการเปลี่ยนรูปคาร์บอนอินทรีย์ไป

เป็นรูปอนินทรีย์ (C mineralization) แล้วปลดปล่อย ออกสู่บรรยากาศในรูปก๊าซ CO_2 หรือบางส่วนนำมาใช้ในการสร้างเป็นเซลล์เนื้อเยื่อ (Puttaso et al., 2011) โดยตลอดระยะเวลาของการหมักพบว่าคาร์บอนที่สูญเสีย (C losses) ออกจากระบบ ภายใต้กรรมวิธี 2; (0.5BC : 1RS) + GM, 3; (1BC : 1RS)+GM และ 4; (1.5BC : 1RS) + GM (18.33, 19.32, และ 22.19% ตามลำดับ) เมื่อเทียบกับกรรมวิธีที่ไม่มีการใส่ถ่านชีวภาพ (กรรมวิธี 1) ซึ่งมีค่าน้อยสุดเท่ากับ 18.15% โดยในช่วง 14 วันแรกของการหมักพบว่าสาเหตุสำคัญของการสูญเสียคาร์บอนในกรรมวิธีที่ 2 > 3 > 4 ตามลำดับ สาเหตุประการหนึ่งเกิดจากฟางข้าวในแต่ละกรรมวิธีมีปริมาณแตกต่างกัน โดยกรรมวิธี 2 มีปริมาณมากที่สุดแต่มีน้อยที่สุดในกรรมวิธี 4 ส่งผลให้การสูญเสียคาร์บอนสูญเสียได้แตกต่างกันตามลำดับดังกล่าว ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนที่ลดต่ำลงในกรรมวิธีที่มีการใส่ถ่านชีวภาพทั้ง 3 กรรมวิธีแสดงให้เห็นอย่างเด่นชัดว่าถ่านชีวภาพมีความเหมาะสมในการใช้เป็นส่วนผสมในการหมักปุ๋ย เนื่องจากสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์คาร์บอนที่พบในวัสดุหมักได้มากขึ้นในระยะเวลาที่นานขึ้น

ไนโตรเจนทั้งหมดมีการเปลี่ยนแปลงลดลงในช่วง 0-7 วันแรกของการหมักในทุกกรรมวิธีทดลองที่มีการใส่ถ่านชีวภาพ ขณะที่กรรมวิธีที่ไม่มีการใส่ถ่านชีวภาพพบว่าการเพิ่มขึ้นของไนโตรเจนอย่างเด่นชัดภายหลัง 21 วันของการหมัก และมีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับกรรมวิธีอื่น ($P < 0.05$) (Figure 3B) การเพิ่มขึ้นของไนโตรเจนในทุกกรรมวิธีมีสาเหตุมาจากการลดลงของสารประกอบอินทรีย์คาร์บอนในระบบการหมัก ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของไนโตรเจนเมื่อเทียบกับเนื้อสารทั้งหมด ดังเห็นได้จากความสัมพันธ์ระหว่างไนโตรเจนที่มีทิศทางตรงข้ามค่า C: N ratio (Table 3) ($P < 0.05$) โดย Huang et al. (2004) ได้อธิบายถึงการเพิ่มขึ้นของไนโตรเจนในระบบปุ๋ยหมักอาจมีสาเหตุได้จากการตรึงไนโตรเจนจากบรรยากาศของจุลินทรีย์บางกลุ่ม อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนและการหายใจที่เป็นไปในทิศทางตรงกันข้าม (-0.5891,

$P < 0.05$) ควรมีการศึกษาต่อไปในเชิงลึกถึงรูป (form) ของไนโตรเจนอนินทรีย์ที่เกิดขึ้นในระบบ อาทิ NH_4^+ และ NO_3^- เป็นต้น ที่มีส่งผลต่อกิจกรรมการหายใจของจุลินทรีย์ ในการศึกษาที่พบว่าค่า C: N ratio เริ่มต้นของทุกกรรมวิธีทดลองมีค่าอยู่ระหว่าง 29.58-30.57 (Figure 3C) โดยค่า C: N ในกรรมวิธี RS + GM ลดลงต่ำใกล้เคียง 20 อย่างรวดเร็วหลังวันที่ 21 ของการหมัก จึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลให้กระบวนการย่อยสลายเกิดขึ้นช้าลงถึงแม้ว่าปริมาณของอินทรีย์คาร์บอนยังคงมีอยู่สูง ($> 200 \text{ g kg}^{-1}$) ในทางกลับกันถึงแม้กรรมวิธีที่มีการใส่ถ่านชีวภาพทั้งหมดมีค่า C: N ratio สูงกว่า 25 ในช่วงท้ายของการหมัก แต่ผลการศึกษาก็แสดงให้เห็นว่าการย่อยสลายในช่วงท้ายที่ค่อนข้างคงที่ มีสาเหตุเนื่องจากการปรับตัวของจุลินทรีย์ที่ปรับเปลี่ยนมาใช้แหล่งคาร์บอนจากถ่านชีวภาพที่มีความยากต่อการย่อยสลายมากขึ้น เปอร์เซ็นต์เถ้าเป็นตัวชี้วัดหนึ่งซึ่งแสดงให้เห็นว่าปุ๋ยหมักมีการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์เพื่อเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบโครงสร้างทางเคมีบางประการ โดยเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์ที่ยากต่อการย่อยสลายให้อยู่ในรูปสารอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อจุลินทรีย์ (Tiquia et al., 2000) เปอร์เซ็นต์เถ้าเริ่มต้นในวัสดุหมักมีค่าสูงสุดไปยังน้อยที่สุดในกรรมวิธีที่ 4 > 3 > 2 > 1 ตามลำดับ ซึ่งให้เห็นว่าปริมาณเถ้าที่คงเหลือในวัสดุหมักมีสาเหตุหลักจากปริมาณถ่านชีวภาพที่ใช้เป็นส่วนผสม ดังเห็นได้จาก Table 1 ที่พบว่าถ่านชีวภาพมีเถ้าสูงสุด (55.9%) เมื่อเทียบกับฟางข้าวและมูลแพะ (47.3% และ 24.2%) เมื่อสิ้นสุดการหมักในวันที่ 49 ยังคงพบว่า รูปแบบการคงเหลือของปริมาณเถ้าในกรรมวิธีทั้ง 4 เป็นไปในทิศทางเดียวกับวันที่ 0 เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของเปอร์เซ็นต์เถ้าในกรรมวิธี RS + GM และ (0.5BC : 1RS) + GM พบว่ามีค่าเท่ากันคือ 23.6% ตามด้วยกรรมวิธีที่ (1BC : 1RS) + GM (22.5%) ขณะที่กรรมวิธี (1.5BC : 1RS) + GM มีการเปลี่ยนแปลงของเถ้าที่น้อยที่สุด (11.4%) ที่บ่งบอกถึงแนวโน้มการย่อยสลายได้น้อยกว่ากรรมวิธีอื่น อย่างไรก็ตามการศึกษานี้ไม่พบความแตกต่างทางสถิติของการเปลี่ยนแปลงของเถ้าเปลี่ยนแปลงของเถ้า

กระบวนการทางชีววิทยา : การหายใจของจุลินทรีย์

การหายใจโดยจุลินทรีย์ (microbial respiration) มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นใน 7 วันหลังการหมักในทุกระบบวิธีทดลอง (Figure 2A) กระบวนการ RS + GM มีการหายใจสูงสุดในช่วงแรก คือวันที่ 0, 3 และ 5 วันหลังการหมัก ($27.8, 28.5$ และ $28.6 \text{ mg CO}_2\text{-C kg}^{-1} \text{ day}^{-1}$) ($P < 0.05$) ขณะที่กระบวนการ (1BC : 1RS) + GM มีการหายใจสูงสุดในช่วงกลางจนถึงช่วงท้าย คือวันที่ 14, 21, 28 และ 35 ($28.5, 25.4, 21.1$ และ $20.2 \text{ mg CO}_2\text{-C kg}^{-1} \text{ day}^{-1}$) ($P < 0.05$) การหายใจในกระบวนการ RS + GM ลดลงหลัง 7 วันของการหมัก และมีความต่ำสุดตั้งแต่วันที่ 14 จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง ($P < 0.05$) ซึ่งให้เห็นว่าจุลินทรีย์ในกองปุ๋ยที่มีเฉพาะฟางข้าวมีการใช้คาร์บอนส่วนที่ย่อยสลายได้ง่ายเป็นแหล่งพลังงานและถูกใช้จนเกือบหมดอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการย่อยสลาย ในทางกลับกันพบว่ากระบวนการที่มีการใส่ถ่านชีวภาพทั้ง 3 กระบวนการมีการหายใจที่สูงกว่ากระบวนการฟางข้าวอย่างเดียวในช่วงกลางจนถึงช่วงท้ายของการหมัก ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าจุลินทรีย์ในกองปุ๋ยมีรูปแบบการปรับตัว (switch mode) เพื่อนำคาร์บอนส่วนที่สามารถย่อยสลายได้ง่าย (oxidizable organic C) ที่พบในถ่านชีวภาพเพื่อนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานในช่วงท้ายของการหมัก โดย Kamolmanit et al. (2013) ได้รายงานการปรับเปลี่ยนพฤติกรรมของจุลินทรีย์มาใช้แหล่งคาร์บอนที่ย่อยสลายได้ยาก (recalcitrant C compounds) (ได้แก่ ลิกนิน และโพลีฟีนอลส์) เมื่อแหล่งคาร์บอนที่ย่อยสลายได้ง่าย (easily decomposable C compounds) (ได้แก่ น้ำตาล และเซลลูโลส) หมดลง ขณะเดียวกันการปลดปล่อยคาร์บอนที่ย่อยสลายได้ง่ายจากถ่านชีวภาพในช่วงที่ปุ๋ยมีอุณหภูมิสูงอาจเกิดได้จากกระบวนการ abiotic oxidation ซึ่งมีรายงานโดย Cheng et al. (2006) ที่ผู้วิจัยพบว่าเมื่อบ่มถ่านชีวภาพร่วมกับดินและมีความร้อนเกิดขึ้นสามารถเกิดกลไกออกซิเดชันที่ส่งผลให้หมู่ฟังก์ชันของคาร์บอนส่วน hydrophobic มีการเปลี่ยนแปลงเป็น hydrophilic ที่ทำให้จุลินทรีย์เข้าย่อยสลายได้เพิ่มขึ้น นอกจากนี้โครงสร้างของถ่านชีวภาพที่แตกต่างกันอันเนื่องมาจากสภาวะที่ใช้ใน

การเผาที่แตกต่างกัน ก็สามารถส่งผลต่อการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ได้เช่นกัน เนื่องจากมีรายงานการศึกษาพบว่าสมบัติทางกายภาพของถ่านชีวภาพมีอิทธิพลต่อสมบัติทั้งทางเคมีและกิจกรรมของจุลินทรีย์ (Cheng et al., 2008)

การหายใจสะสม (cumulative respiration) บ่งชี้ได้ถึงกิจกรรมของจุลินทรีย์ในการย่อยสลายอินทรีย์คาร์บอนแล้วปลดปล่อยออกมาในรูปของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตลอดช่วงระยะเวลาของการหมัก การหายใจสะสมมีค่าสูงสุดในกระบวนการ RS + GM ในช่วงแรกของการหมัก (วันที่ 0-14) ($P < 0.05$) ขณะที่กระบวนการ (1BC : 1RS) + GM มีการสะสมการหายใจสูงสุดในกลางจนถึงช่วงท้ายของการหมัก (วันที่ 21-49) (Figure 2B) การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าสัดส่วนที่เหมาะสมในการย่อยสลายสารอินทรีย์คาร์บอนในวัสดุหมักได้แก่ กระบวนการที่ 3 คือ ถ่านชีวภาพต่อฟางต่อมูลแพะ เท่ากับ 1 : 1 : 2.6 (2.2 ต่อ 2.2 ต่อ 5.8 kg) ขณะที่กระบวนการ (0.5BC : 1RS) + GM ซึ่งมีถ่านชีวภาพต่อฟางเท่ากับ 1.3 ต่อ 2.5 kg มีการหายใจสะสมที่ต่ำกว่าเนื่องจากปริมาณคาร์บอนที่ย่อยสลายได้ง่ายที่พบในถ่านชีวภาพมีไม่เพียงพอสำหรับการย่อยสลายให้ดำเนินต่อไปอย่างต่อเนื่องได้ ในทำนองเดียวกันการศึกษานี้ยังพบว่ากระบวนการ (1.5BC : 1RS) + GM ซึ่งมีถ่านชีวภาพต่อฟางเท่ากับ 2.8 ต่อ 1.8 kg นั้นไม่เหมาะสมต่อการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์เช่นเดียวกัน เนื่องจากจุลินทรีย์เริ่มต้นส่วนใหญ่ในกลุ่มของจุลินทรีย์เชื้อเร่ง พด.1 มีสมบัติในการย่อยสลายเซลลูโลสที่ง่ายต่อการนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงาน (กรรมพัฒนาที่ดิน, 2550) ซึ่งเซลลูโลสพบปริมาณสูงในฟางข้าวประมาณ 500 g kg^{-1} (Puttasso et al., 2011) แต่กระบวนการ (1.5BC : 1RS) + GM นั้นมีปริมาณเซลลูโลสจากฟางข้าวต่ำสุด (Table 1) แต่มีคาร์บอนส่วนที่ต้านทานต่อการย่อยสลายจากถ่านชีวภาพมากที่สุด (Table 2) จึงเป็นอัตราส่วนที่ไม่เหมาะสมต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ในการย่อยสลายระหว่างการหมัก อย่างไรก็ตามจุลินทรีย์ พด. 1 ที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นชนิดผสม (mixed culture) ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของกิจกรรมของจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในวัสดุหมักจึงสามารถอธิบายได้

หลายกลไก อาทิเช่น ปრაการณกรณฟงกซันนลร็ดันแคนซี (functional redundancy) ซึ้งเป็นปრაการณกรณที่สารอาหารระหวางการยอยสลายนมีการเปลยนเปลงแล้วทำให้จุลินทรีย์หลากหลายสปีชีส์เหล่านั้นพยายามที่จะรักษาหน้าที่ในการยอยสลายนให้คงอยู่ไว้ได้ภายใต้สภาพแวดล้อมที่เปลยนเปลงนั้น (Kamolmanit et al., 2013) นอกจากนั้นกลไกหนึ่งที่สามารถนำมาใช้อธิบายการเปลยนเปลงของกิจกรรมจุลินทรีย์ระหว่างการยอยสลายน คือ ปრაการณกรณฟงกซันนลสเปเชียลไลเซชัน (functional specialization) ซึ้งเกิดขึ้นตรงกันข้ามกับ functional redundancy (Rasche and Cadisch, 2013) นั่นคือจุลินทรีย์บางกลุ่มมีการปรับตัวให้สามารถยอยสลายนคาร์บอนในวัสดุอินทรีย์ที่หลากหลาย ได้แก่ น้ำตาล คาร์โบไฮเดรต เซลลูโลส ลิกนิน และโพลีฟีนอลส์ เป็นต้น กลไกดังกล่าวจึงสามารถส่งผลให้กรรมวิธีที่ใส่ถ่านชีวภาพทั้ง 3 กรรมวิธี มีการปลดปล่อย CO₂ สูงกว่ากรรมวิธีที่ใส่ฟางข้าวเพียงอย่างเดียว เมื่อพิจารณาสมบัติปุ๋ยหมักตามเกณฑ์มาตรฐานของกรมพัฒนาที่ดินพบว่าในทุกกรรมวิธีของปุ๋ยหมักที่มีการใส่ถ่านชีวภาพมีปริมาณไนโตรเจน 0.7-0.8% ซึ้งต่ำกว่าเกณฑ์ที่ระบุ

ว่าควรมากกว่า 1.0% สาเหตุเนื่องจากปริมาณไนโตรเจนเริ่มต้นของทุกกรรมวิธีที่ทดลองมีค่าต่ำกว่า 1.0% อย่างไรก็ตามปุ๋ยหมักในกรรมวิธีที่ 3 มีค่า pH เท่ากับ 7.96 และอินทรีย์คาร์บอนเท่ากับ 186.25 g kg⁻¹ ซึ้งเทียบเท่ากับอินทรีย์วัตถุ 32.04 % ซึ้งผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานของกรมพัฒนาที่ดิน นอกจากนี้ยังพบว่าการปลดปล่อย CO₂-C จากปุ๋ยหมักในทุกกรรมวิธีที่ใส่ถ่านชีวภาพผ่านตามเกณฑ์ของ Compost Maturity Index (California Compost Quality Council, 2001) ที่กำหนดค่าการหายใจโดยจุลินทรีย์ของปุ๋ยหมักที่สมบูรณ์ไว้ไม่เกิน 2 mg CO₂-C g⁻¹ OC day⁻¹ การยอยสลายนมวลเนื้อสารของปุ๋ยหมักในกรรมวิธีที่ 3 เท่ากับ 65% ยังคงต่ำกว่าเกณฑ์ของกรมพัฒนาที่ดินที่กำหนดไว้มากกว่า 80% สาเหตุดังกล่าวเนื่องจากถ่านชีวภาพที่ใช้ในการทดลองมีส่วนที่ต้านทานต่อการยอยสลายน (recalcitrant C compound) สูงถึง 90% อย่างไรก็ตามคาร์บอนส่วนที่ต้านทานต่อการยอยสลายนนี้มีประโยชน์ต่อการช่วยเก็บกักคาร์บอนในดิน (Deenik et al., 2011; Hemmes and Schmidt, 2009)

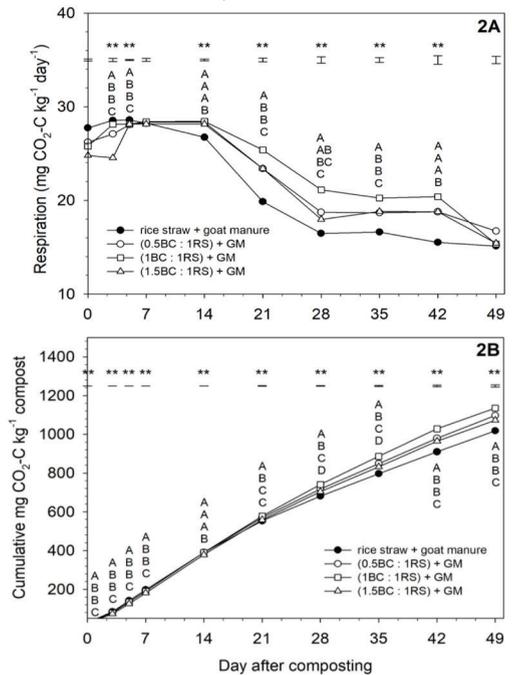


Figure 2 Dynamics of respiration (A) and cumulative CO₂-C (B) during composting. At each sampling date, data with different letters are significantly different at P<0.05 (LSD). Vertical bars represent standard error of the difference (SED)

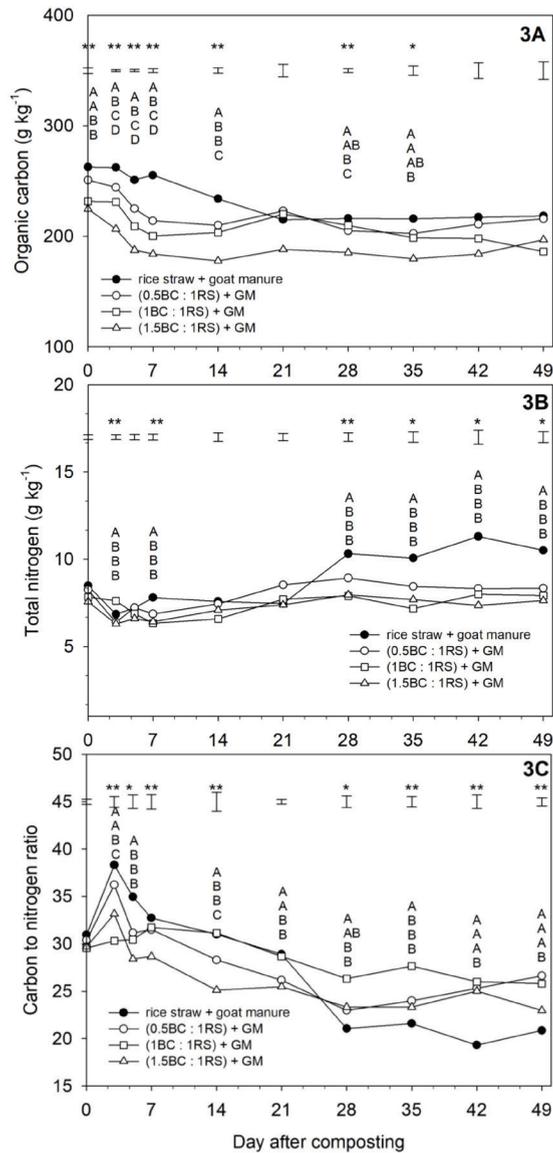


Figure 3 Changes in organic carbon (A), total nitrogen (B) and carbon-to-nitrogen ratio (C) during composting. At each sampling date, data with different letters are significantly different at P<0.05 (LSD). Vertical bars represent standard error of the difference (SED)

สรุป

องค์ประกอบทางเคมีของสารอินทรีย์เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อจุลินทรีย์ในการย่อยสลายระหว่างกระบวนการหมักปุ๋ย ถ่านชีวภาพกรอบเป็นผลพลอยได้จากการร่อนถ่านชีวภาพที่มีศักยภาพใน

การนำมาเป็นวัสดุเริ่มต้นในการหมักปุ๋ย จุลินทรีย์มีการปรับตัวเพื่อใช้คาร์บอนที่ใช้ได้ง่าย (ออกซิไดซ์ได้ง่าย) จากฟางข้าวมาเป็นถ่านชีวภาพ เมื่อแหล่งคาร์บอนที่ย่อยสลายได้ง่ายนั้นหมดลง ปุ๋ยหมักที่มีการใส่ฟางข้าวเพียงอย่างเดียวมีการสูญเสียคาร์บอนออกจากระบบอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการหมัก แต่การใส่ถ่าน

ชีวภาพร่วมกับฟางข้าวในอัตราส่วน 1 : 1 ช่วยรักษา ระดับความชื้นของปุ๋ยได้นานขึ้น คุณหมุมิที่ร่อนของ ปุ๋ยหมักบ่งชี้ว่าการย่อยสลายยังคงดำเนินต่อไป ได้นานขึ้นโดยไม่เป็นการเพิ่มระยะเวลาของการหมัก เมื่อเทียบกับกรรมวิธีปกติที่ไม่มีการใส่ถ่านชีวภาพ เมื่อเปรียบเทียบกับในแง่ของปริมาณคาร์บอนที่เข้าสู่ ระบบพบว่า การใส่ถ่านชีวภาพร่วมกับฟางข้าวช่วยเพิ่ม ประสิทธิภาพการย่อยสลายอินทรีย์คาร์บอนได้มี ประสิทธิภาพสูงขึ้นเมื่อเทียบกับปุ๋ยหมักที่ไม่มีส่วน ผสมของถ่านชีวภาพ การศึกษานี้ยังแสดงให้เห็นเพิ่ม เต็มว่าการเปลี่ยนแปลงคุณหมุมิของปุ๋ยสามารถใช้ เป็นตัวชี้วัดสำคัญของความสมบูรณ์ของปุ๋ยหมักได้ เช่นเดียวกับค่าความเป็นกรด-ด่าง ความชื้น อัตราส่วน คาร์บอนต่อไนโตรเจน และเปอร์เซ็นต์ไถ่่า อย่างไรก็ตาม การทดลองนี้ได้วัดการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอน และไนโตรเจนในรูปของคาร์บอนอินทรีย์และ ไนโตรเจนทั้งหมด ดังนั้นการศึกษานี้จึงมีผลต่อการ ไปของการเปลี่ยนรูปของสารประกอบอินทรีย์ไปเป็นรูป อินทรีย์ (mineralization) จึงควรวัดการเปลี่ยนรูปของ สารประกอบดังกล่าวที่จุลินทรีย์นำมาสร้างเป็นเซลล์ เนื้อเยื่อจุลินทรีย์ (metabolic quotient) ที่สัมพันธ์กับ การหายใจ ร่วมกับตัวชี้วัดอื่น เช่น กิจกรรมของเอนไซม์ เป็นต้น เพื่อเข้าใจถึงศักยภาพของจุลินทรีย์ในการย่อย สลายสารประกอบอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพได้ อย่างลึกซึ้งมากยิ่งขึ้น

คำขอบคุณ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์วิทยาศาสตร์ภายใต้ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีและศูนย์ฝึกอบรม และวิจัยทางการเกษตร (100 ไร่) มหาวิทยาลัยราชภัฏ นครราชสีมาที่ให้ความเอื้อเฟื้อสถานที่ทำการทดลอง และวัสดุอุปกรณ์บางส่วนในการทำวิจัย คณะผู้วิจัย ขอขอบคุณ คุณกษมล ทานสมบัติ หน่วยงานกรม พัฒนาที่ดินที่อำนวยความสะดวกในการจัดหา จุลินทรีย์ซูเปอร์ พด.1

เอกสารอ้างอิง

- กรมพัฒนาที่ดิน. 2550. การผลิตปุ๋ยหมักโดยใช้สารเร่ง ชูเปอร์ พด.1 เอกสารทางวิชาการเผยแพร่. www. ldd.go.th/menu_Dataonline/G1/G1_13.pdf. ค้น เมื่อ 10 ธันวาคม 2560.
- Anderson, J. P. E. 1982. Soil respiration, pp. 831- 871. In: Page, A. L., R. H. Miller, and D. R. Keeney (eds.), Agronomy Monograph Number 9, Part II. Chemical and Biological Properties, 2nd. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, USA.
- Antal, M. J. and M. Grønli. 2003. The art, science, and technology and charcoal production. Ind. Eng. Chem. Res. 42: 1619-1640.
- Brodowski, S., B. John, H. Flessa and W. Amelung. 2006. Aggregates-occluded black carbon in soil. Eur. J. Soil Sci. 57: 539-546.
- Brodowski, S., W. Amelung, L. Haumaier, C. Abetz and W. Zech. 2005. Morphological and chemical properties of black carbon in physical soil fractions as revealed by scanning electron microscopy and energy-dispersive X-ray spectroscopy. Geoderma. 128: 116-129.
- 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., J. L. Deenik, B. Toomsan, M. J. Antal and P. Vityakon. 2016. Biochar properties influencing greenhouse gas emissions in tropical soils differing in texture and mineralogy. J. Environ. Qual. 45: 1509-1519

- Camps, M. 2015. The use of biochar in composting. International biochar initiative. <http://www.biochar-international.org> Accessed Dec. 25, 2017.
- Chan, K. Y., Z. L. Van, A. I. Meszaros, A. Downie and S. Joseph. 2008. Agronomic values of green waste biochar as a soil amendment. *Soil Res.* 45: 629-634.
- Cheng C. H., J. Lehmann, J. E. Thies, S. D. Burton and M.H. Engelhard. 2006. Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes. *Org. Geochem.* 37:1477–1488.
- Cheng, C. H., J. Lehmann, and M. H. Engelhard. 2008. Natural oxidation of black carbon in soils: changes in molecular form and surface change along a climosequence. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 72: 1598–1610.
- Chaiwong, K., and S. Siripornakarachai. 2016. Parametric analysis of biochar production from corncob under slow pyrolysis. *Engng. J. CMU.* 23: 85-92.
- California Compost Quality Council. 2001. Compost Maturity Index: Technical Report [Online]. Available: <http://compostingcouncil.org/wp/wp-content/uploads/2014/02/2-CCQC-Maturity-Index.pdf>. Accessed Apr. 22, 2018.
- 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.
- Dias, B. O., C. A. Silva, F. S. Higashikawa, A. Roig, M. A. Sánchez-Monedro. 2010. Use of biochar as bulking agent for the composting of poultry manure : effect on organic matter degradation and humification. *Biores Technol.* 101: 1239-1246.
- Gaskin, J. W., C. Steiner, K. C. Harris, C. Das and B. Bibens. 2008. Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use. *T. ASABE.* 51: 2061-2069.
- Gaskin, J. W., R. A. Speir, K. Harris, K. C. Das, R. D. Lee, L. A. Morris, and D. S. Fisher. 2010. Effect of peanut hull and pine chip biochar on soil nutrients, corn nutrient status, and yield. *Agron. J.* 102: 623-633.
- 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. *J. Environ. Qual.* 41: 1096-1106.
- Herath, H. M. S. K., M. Camps-Arbestain, and M. Hedley. 2013. Effect of biochar on soil physical properties in two contrasting soils: an Alfisol and an Andisol. *Geoderma.* 209: 188-197.
- Hemmes, K. and W. I. Schmidt. 2009. Changes of biochar in soil. pp. 169-182. In: J. Lehmann and S. Joseph (eds). *Biochar for environmental Management: Science and Technology.* Earthscan, United Kingdoms.
- Huang, G. F., J. W. C. Wong, Q. T. Wu, and B. B. Nagar. 2004. Effect of C/N on composting of pig manure with sawdust. *Waste Manage. Res.* 24: 805-813.
- Jindo, K., Mizumoto, H., Sawada, Y., Sanchez-Monedero, M. A., and Sonoki, T. 2014. Physical and chemical characterization of biochars derived from different agricultural residues. *Biogeosciences.* 11: 6613-6621.
- Kamolmanit, B. and A. Reungsang 2006. Effect of cassava pulp and swine manure compost on growing plants in Greenhouse. *J. Water Environ. Technol.* 4: 9-32.

- Kamolmanit, B., P. Vityakon, W. Kaewpradit, G. Cadish and F. Rasche. 2013. Soil fungal communities and enzyme activities in a sandy, highly weathered tropical soil treated with biochemically contrasting organic inputs. *Biol. Fertil. Soils*. 49: 905-917.
- Major, J., M. Rondon, D. Molina, S. Riha, and J. Lehmann. 2010. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna Oxisol. *Plant Soil*. 333: 117-128.
- Novak, J. M., I. Lima, B. Xing, J. W. Gaskin, C. Steiner, K. C. Das, M. Ahmedna, D. Rehrh, D. W. Watts, W. J. Busscher, and S. Harry. 2009. Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy Sand. *Annals Environ. Sci*. 3: 195-206.
- 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. Agroecosyst*. 89: 159-174.
- Rasche, F., and G. Cadisch. 2013. The molecular microbial perspective of organic matter turnover and nutrient cycling in tropical agroecosystems - What do we know?. *Biol. Fertil. Soils*. 49: 251-262.
- Steiner, C., Das, K. C., Melear, N. and Lakely, D. 2010. Reducing nitrogen Loss during poultry litter composting using biochar. *J. Environ. Qual*. 39: 1236-1242.
- Steiner, C., Melear, N., Harris, K. and Das, K. C. 2011. Biochar as bulking agent for poultry litter composting. *Carbon Manag.* 2: 227-230.
- Tiquia, S. M., T. L. Richard, M. S. and Honeyman. 2000. Effect of windrow turning and seasonal temperatures on composting of hog manure from hoop structures. *Environ. Technol*. 21: 1037-1046.
- Trupiano, D., C. Claudia, B. Silvia, A. Carla, P. V. Francesco, L. Giuseppe, Di L. Sara, F. Francesca, T. Roberto, and S. S. Gabriella. 2017. The effects of biochar and its combination with compost on lettuce (*Lactuca sativa* L.) growth, soil properties, and soil microbial activity and abundance. *Int. J. Agron*. 1-12.
- Walkley, A., and I. A. Black. 1934. An examination of the Degtjoreff method for determining soil organic matter and proposed modification of chromic acid titration method. *Soil Sci*. 27: 29-38.
- Zhang, Y., O. J. Idowu, and C. Brewer. 2016. Using agricultural residue biochar to improve soil quality of desert soils. *Agriculture*. 6: 1-11.