วารสารแก่นเกษตร THAIJO

Content List Available at ThaiJo

Khon Kaen Agriculture Journal

Journal Home Page : https://li01.tci-thaijo.org/index.php/agkasetkaj

การใช้ถ่านชีวภาพมูลแพะร่วมกับการปรับสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนและการใช้จุลินทรีย์เชื้อเร่งต่อสมบัติปุ๋ยหมักผักตบชวา

The influence of goat manure biochar amendment to adjust C/N in combination with microbial activator on the decomposition pattern of water hyacinth compost

ชาษิต กมลมานิทย์[1]*, สุกฤตยา ด่านณรงค์[1], ณัฏฐกิตติยา ไพบูลย์[2] และ อัจฉราวดี เครือภักดี[3]

Chasit Kamolmanit[1]*, Sukrittaya Dannarong[1], Natthakittiya Paiboon[2] and Ajcharawadee Kruapukdee[3]

[1] *สาขาวิชาเกษตรศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา*
[1] *Department of Agriculture, Faculty of Science and Technology, Nakhon Ratchasima Rajabhat University, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand*
[2] *สาขาชีววิทยาประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน*
[2] *Faculty of Agriculture and Technology, Rajamangala University of Technology Isan Surin Campus Surin province*
[3] *คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์ จังหวัดสุรินทร์*
[3] *Applied Biology major, Faculty of Science and Liberal Arts, Rajamangala University of Technology Isan*

บทคัดย่อ: การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการใช้ถ่านชีวภาพมูลแพะเพื่อปรับค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) และการใช้จุลินทรีย์เชื้อเร่ง (microbial activators, MA) 2 ชนิด คือ M1 (เชื้อจุลินทรีย์จาก พ.ด. 1) และ MA 2 (เชื้อจุลินทรีย์จาก พด 2)ที่ส่งผลต่อสมบัติบางประการของปุ๋ยหมักผักตบชวา การทดลองประกอบด้วย 6 กรรมวิธี ดังนี้ 1) สัดส่วน C/N = 30:1 2) สัดส่วน C/N = 30:1+MA1 3) สัดส่วน C/N = 30:1+MA2 4) สัดส่วน C/N = 35:1 5) สัดส่วน C/N = 35:1+MA1 และ 6) สัดส่วน C/N = 35:1+MA2 วางแผนการทดลองแบบ randomized complete block design (RCBD) จำนวน 3 ซ้ำ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าภายใน 17 วันแรกของการย่อยสลายในทุกกรรมวิธีที่ปรับค่า C/N เริ่มต้นเท่ากับ 30:1 มีอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างการหมักสูงกว่าทุกกรรมวิธีที่ปรับค่า C/N = 35:1 โดยเฉพาะกรรมวิธี C/N = 30:1+MA1 มีอุณหภูมิเฉลี่ยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 52.9 °C และคงระยะเวลาอุณหภูมิสูง (>50 °C) ได้นานที่สุดเท่ากับ 7 วัน ($P<0.05$) ในวันที่ 56 ของการทดลองพบว่ากรรมวิธี C/N = 30:1+MA1 มีคาร์บอนอินทรีย์ลดต่ำสุดเท่ากับ 29.90 % คิดเป็นสัดส่วนคาร์บอนที่สูญเสียไปจากการย่อยสลายเท่ากับ 23.92% โดยมีค่า C/N เท่ากับ 18.7 ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดสูงสุดเท่ากับ 1.6% ($P<0.05$) มีค่า pH เท่ากับ 7.55 และความชื้นของวัสดุหมักเท่ากับ 17.55% และกิจกรรมของเอนไซม์ β-glucosidase เท่ากับ 266.7 µg *p*-nitrophenol/g compost/h ในทางเพิ่มเติมกรรมวิธี C/N = 35:1+MA1 ยังมีกิจกรรมของเอนไซม์ β-glucosidase สูงสุดเท่ากับ 266.7 *µg p*-nitrophenol/g compost/h ($P<0.05$) การศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าปริมาณการใช้ถ่านชีวภาพมูลแพะในวัสดุหมักเพื่อปรับค่าอัตราส่วน C/N และการเลือกใช้ชนิดของจุลินทรีย์เชื้อเร่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อรูปแบบการย่อยสลายและผลผลิตที่ได้ของวัสดุหมักจากผักตบชวา

คำสำคัญ: ปุ๋ยหมัก; ผักตบชวา; ถ่านชีวภาพมูลแพะ; จุลินทรีย์เชื้อเร่ง; กิจกรรมบีตา-กลูโคสิเดส

ABSTRACT: This study aims to investigate the influence of goat manure biochar on adjusting the carbon-to-nitrogen ratio (C/N ratio) and the use of two types of microbial activators (MA) that affect some properties of water hyacinth compost. The experiment consisted of six treatments as follows: 1) C/N = 30:1, 2) C/N = 30:1+MA1, 3)

* Corresponding author: bhanudacha@yahoo.com

Received: date; July 15, 2024 Revised: date; December 5, 2024

Accepted: date; December 11, 2024 Published: date; May 30, 2025

C/N = 30:1+MA2, 4) C/N = 35:1, 5) C/N = 35:1+MA1, and 6) C/N = 35:1+MA2. A randomized complete block design (RCBD) with three replicates was performed. The results showed that during the first 17 days of decomposition, all treatments with an initial C/N ratio value of 30:1 had a higher average temperature than those with an initial C/N ratio value of 35:1. Specifically, the C/N = 30:1+MA1 treatment exhibited the highest average temperature of 52.9 ˚C and maintained a high temperature (>50 ˚C) for seven days (P<0.05). On day 56 of the experiment, the C/N = 30:1+MA1 treatment showed the lowest percentage reduction in organic carbon of 29.90%, which corresponded to 23.92% of carbon lost through decomposition. The same treatment had a C/N ratio of 18.7 on day 56, the highest total nitrogen content at 1.6% (P<0.05), a pH of 7.55, and a percentage moisture content of the composted material of 17.55%. In addition, the treatment C/N = 35:1+MA1 also had the highest β-glucosidase activity at 266.7 µg *p*-nitrophenol/g compost/h (P<0.05). This study suggests that the concentration of goat manure biochar in compost material can be used to control the C/N ratio and that the selection of microbial activators plays a crucial role in affecting the decomposition pattern of water hyacinth compost.
Keywords: compost; water hyacinth; goat manure biochar; microbial activator; β-glucosidase activity

บทนำ

ถ่านชีวภาพเป็นแหล่งของธาตุอาหารพืชที่สำคัญ ได้แก่ แคลเซียม (Ca^{2+}) แมกนีเซียม (Mg^{2+}) และโซเดียม (Na^{+}) เมื่อไอออนเหล่านี้ถูกปล่อยจากถ่านออกสู่ดินสามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชที่ปลูกในดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำให้เพิ่มขึ้น (Major et al., 2010; Butnan et al., 2015) การใช้ประโยชน์จากถ่านชีวภาพในทางเกษตรจึงมุ่งเน้นการเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน โดยเฉพาะแง่ของการเพิ่มธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารรองให้กับพืช (Butnan et al., 2015; Chan et al., 2008; Gaskin et al., 2010; Hass et al., 2012; Herath et al., 2013) ถ่านชีวภาพถูกใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของดิน ได้แก่ การสร้างเม็ดดิน (Brodowski et al., 2005; Brodowski et al., 2006) การกักเก็บคาร์บอนรูปที่เสถียรในดิน (Chan et al., 2008; Novak et al., 2009) รวมถึงการดูดซับธาตุอาหารพืชที่เป็นแคตไอออนบางธาตุให้กับดิน (Joseph et al., 2009) ถ่านชีวภาพจึงมีความโดดเด่นทั้งในแง่การปรับปรุงและฟื้นฟูความอุดมสมบูรณ์ของดินในเวลาเดียวกัน (Deenik et al., 2011; Gaskin et al., 2008; Hemmes and Schmidt, 2009) มีการศึกษาพบว่าถ่านชีวภาพมีศักยภาพในดูดซับก๊าซแอมโมเนีย (Camps, 2015) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการหมักปุ๋ย ด้วยเหตุนี้ถ่านชีวภาพจึงมีบทบาทช่วยลดการสูญเสียไนโตรเจนระหว่างกระบวนการย่อยสลายวัสดุอินทรีย์ที่มีการใส่ถ่านชีวภาพได้ อีกทั้งมีรายงานว่าถ่านชีวภาพช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะในการเกาะยึดจุลินทรีย์จึงส่งเสริมการทำงานในการย่อยสลายวัสดุอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ได้เพิ่มขึ้น (Trupiano et al., 2017) อย่างไรก็ตามการศึกษาโดยส่วนใหญ่ยังคงนิยมใส่ถ่านชีวภาพในดินร่วมกับวัสดุอินทรีย์มากกว่านำมาเป็นส่วนผสมในปุ๋ยหมัก สาเหตุหนึ่งที่การประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพเพื่อเป็นส่วนผสมในปุ๋ยหมักมีค่อนข้างน้อย อาจเนื่องจากสมบัติทางโครงสร้างของถ่านที่มีความเสถียรกว่าวัสดุอินทรีย์ตามธรรมชาติ (Skjemstad et al., 2002) แต่ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากมูลสัตว์มีคาร์บอนส่วนที่ต้านทานการย่อยสลายต่ำกว่าวัสดุประเภทไม้ (Guo et al., 2020) และยังมีธาตุอาหารหลักของพืช คือ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมที่สูงกว่าพืชรวมถึงวัสดุทางการเกษตรหลายชนิด (Sarfaraz et al., 2020; สินธนา และภาณุเดชา, 2562; Kanouo et al., 2018) ด้วยเหตุนี้ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากมูลสัตว์จึงได้เปรียบในแง่การนำมาใช้เป็นส่วนผสมในวัสดุหมัก ผักตบชวา (*Eichhornia crassipes*) เป็นพืชน้ำที่พบได้ในหลายพื้นที่ทั่วโลกที่ถูกนำมาใช้เป็นทั้งแหล่งพลังงานทดแทน (Sindhu et al., 2017) แม้กระทั่งใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านชีวภาพ (Masto et al., 2013) ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ในการนำมาใช้ผลิตปุ๋ยหมัก ผักตบชวามีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบประมาณ 14.46% และยังมี K Ca และ Mg สูงเท่ากับ 8.26 4.73 และ 1.96% โดยน้ำหนัก (Sukarni et al., 2019) ทั้งนี้ในกระบวนการย่อยสลายวัสดุอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ถูกควบคุมโดยอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) ซึ่งค่าที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 25/1 - 30/1 (Torres-Climent et al., 2015) อย่างไรก็ตามมีรายงานว่าผักตบชวามีค่า C/N เท่ากับ 10.8 (Hadiyarto et al., 2019) ซึ่งค่า C/N ที่ต่ำนี้จะส่งผลให้ไนโตรเจนที่จุลินทรีย์นำไปใช้มีมากเกินพอจึงส่งผลให้ไนโตรเจนบางส่วนถูกปลดปล่อยออกมาในรูปก๊าซแอมโมเนีย (Cornell Waste Management Institute, 1996) ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของการสูญเสียธาตุอาหารไนโตรเจนประการหนึ่ง (Nakhshiniev et al., 2014) จากการศึกษาของสินธนาและภาณุเดชา (2562) พบว่าถ่านชีวภาพมูลแพะมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบสูงถึง 31.5% จึงมีความเป็นไปได้ในการนำถ่านชีวภาพมูลแพะมาใช้เป็นส่วนผสมเพื่อควบคุมค่า C/N เริ่มต้นของวัสดุหมักผักตบชวามีคาร์บอนในรูปเซลลูโลสที่เป็นองค์ประกอบราว 25% โดยน้ำหนัก (Varanasi et al., 2017) ซึ่งต่ำกว่าวัสดุประเภทฟางข้าว

(*Oryza sativa* L.) ที่มีเซลลูโลสราว 50% (Puttaso et al., 2011) ขณะเดียวกันผักตบชวายังมีสารระเหย (volatile matter) สูงถึง 61.2% (Sukarni et al., 2019) จึงจำเป็นต้องมีการศึกษารูปแบบการย่อยสลายหากนำผักตบชวามาใช้ผลิตปุ๋ยหมัก โดยมีการเลือกใช้จุลินทรีย์เชื้อเร่งที่เหมาะสมกับวัตถุดิบที่มีความสามารถดูดซับความชื้นได้สูงอย่างผักตบชวา ซึ่งช่วยให้คาดหมายได้ว่าจะได้ปุ๋ยหมักที่มีคุณภาพตามเกณฑ์กำหนดโดยกรมวิชาการเกษตร (กรมวิชาการเกษตร, 2548) อย่างไรก็ตามการผลิตปุ๋ยหมักโดยเกษตรกรส่วนใหญ่หรือภายในฟาร์มทั่วไปยังคงใช้วิธีการกะปริมาณน้ำหนักของวัสดุโดยไม่ได้ใช้ค่า C/N เป็นพื้นฐาน ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอัตราของถ่านชีวภาพมูลแพะที่ใช้ผสมในปุ๋ยหมักจากผักตบชวาที่ส่งผลต่อสมบัติทางฟิสิกส์ เคมี และชีววิทยาบางประการระหว่างกระบวนการย่อยสลายของปุ๋ยหมัก เพื่อเป็นทางเลือกใหม่ในการใช้ประโยชน์จากถ่านชีวภาพมูลสัตว์เพื่อนำมาปรับค่าอัตราส่วน C/N เริ่มต้นที่แม่นยำ และสามารถเลือกใช้จุลินทรีย์เชื้อเร่งได้เหมาะสมกับชนิดของวัสดุหมักที่เลือกใช้

วิธีการศึกษา

วัสดุอุปกรณ์และการเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์

มูลแพะได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์ฝึกอบรมและวิจัยทางการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา ต. ไชยมงคล อ. เมือง จ. นครราชสีมา ถ่านชีวภาพมูลแพะเตรียมโดยกระบวนการเผาแบบไพโรไลซิสด้วยเตาประดิษฐ์จากวัสดุเหล็กกล้าขนาด 200 litre ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง x ความสูงเท่ากับ 60 x 90 cm ภายในบรรจุปี๊บขนาด กว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ 25 x 25 x 35 cm ได้จำนวน 2 ปี๊บต่อรอบการผลิต ใช้เวลาเผารวมระยะอบ 1 สัปดาห์ ผักตบชวาเก็บเกี่ยวจากแหล่งน้ำธรรมชาติในเขตพื้นที่ อ. ประทาย จ. นครราชสีมา ช่วงเดือนกรกฎาคม 2566 จุลินทรีย์เชื้อเร่ง (microbial activator, MA) 2 ชนิด ได้แก่ พด. 1 (MA1) และพด. 2 (MA2) ได้รับความอนุเคราะห์จากกรมพัฒนาที่ดิน เตรียมปุ๋ยหมักโดยผสมผักตบชวา มูลแพะ และถ่านชีวภาพมูลแพะ ในอัตราส่วนที่ได้จากการคำนวณบนฐานเปอร์เซ็นต์คาร์บอนอินทรีย์ที่ออกซิไดส์ได้ (oxidizable organic C) ไนโตรเจนทั้งหมด (total N) และความชื้น (moisture content) โดยใช้โปรแกรมคำนวณออนไลน์ (Cornell Waste Management Institute, 1996) ให้ได้ค่า C/N เท่ากับ 30/1 และ 35/1 การทดลองประกอบด้วย 6 กรรมวิธี ดังนี้ 1) สัดส่วน C/N = 30:1 2) สัดส่วน C/N = 30:1 + MA1 3) สัดส่วน C/N = 30:1 + MA2 4) สัดส่วน C/N = 35:1 5) สัดส่วน C/N = 35:1 + MA1 และ 6) สัดส่วน C/N = 35:1 + MA2 ทั้งนี้กรรมวิธีที่ 2 3 5 และ 6 เติมจุลินทรีย์เชื้อเร่งในอัตรา 100 g ต่อวัสดุหมัก 40 kg (wet weight) ส่วนกรรมวิธีที่ 1 และ 4 ไม่มีการเติมจุลินทรีย์เชื้อเร่ง (ควบคุม) สมบัติบางประการของวัตถุดิบเริ่มต้นแสดงดัง **Table1** ภายหลังผสมวัสดุในวันที่ 0 ทำการปรับความชื้นที่ 60% (by weight) และทุกสัปดาห์ วัดอุณหภูมิภายนอก (ambient temperature) และภายในกองวัสดุหมักโดยใช้เทอโมมิเตอร์ในวันที่ 0 (≈ 3 ชั่วโมงหลังปรับความชื้น) และตรวจวัดอุณหภูมิวันเว้นวันจำนวน 5 จุดจากแต่ละหน่วยทดลองเพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย หยุดตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นเมื่ออุณหภูมิอยู่ในสภาวะคงที่ (±<3 °C) เป็นเวลาหนึ่งสัปดาห์ และภายหลังจากนั้นอีกหนึ่งสัปดาห์ทำการเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์สมบัติทางฟิสิกส์และเคมี

วางแผนการทดลองแบบ randomized complete block design (RCBD) ประกอบด้วย 3 ซ้ำการทดลอง การจัดหน่วยทดลองแสดงดัง **Table 2** ทำการเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ pH โดย pH meter (วัสดุ: น้ำ = 1: 10 w/v) ความชื้นโดยวิธี gravimetric method คำนวณเปอร์เซ็นต์ความชื้นเพื่อใช้ร่วมกับตัวชี้วัดที่อยู่บนฐานน้ำหนักวัสดุแห้ง คาร์บอนอินทรีย์ที่ออกซิไดซ์ได้ด้วย ไดโครเมตโดยวิธี wet digestion (Walkley and Black, 1934) total N โดยวิธี micro Kjeldahl (Alef and Nannipieri, 1995) total P โดยย่อยด้วยกรดไนตริกและเปอร์คลอริก พัฒนาสีด้วยสารละลายวานาโดโมลิบเดต วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 420 nm (Olsen and Sommers, 1982) total K โดยย่อยด้วยกรดไนตริกและเปอร์คลอริก วัดความเข้มข้นธาตุโดยใช้ Atomic absorption spectrophotometer กิจกรรมของเอนไซม์บีตา-กลูโคสิเดส (β-glucosidase ตามวิธีของ Alef and Nannipieri (1995) โดยใช้ *p*-nitrophenyl β-d-glucopyranoside เข้มข้น 25 mM เป็นสารตั้งต้น (substrate) ค่าวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate analysis) โดยวิธีมาตรฐาน ASTM 1762-84 (American Standard of Testing Material, 1990) ดังนี้ อบตัวอย่างวัสดุที่อุณหภูมิ 105 ºC จน

น้ำหนักคงที่ วิเคราะห์ปริมาณสารระเหย (Volatile matter) โดยเผาที่อุณหภูมิ 950 ºC เป็นเวลา 6 นาที วิเคราะห์ปริมาณเถ้า (Ash) โดยเผาที่อุณหภูมิ 750 ºC เป็นเวลา 6 ชั่วโมง กระทั่งน้ำหนักคงที่จากนั้นคำนวณปริมาณคาร์บอนคงตัว (fixed C)

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ข้อมูลจากค่าการวิเคราะห์ของตัวชี้วัดนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ตามแผนการทดลองแบบ RCBD เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกรรมวิธีทดลองโดยใช้วิธี Least Significant Difference (LSD) ที่ P<0.05 โดยโปรแกรม Statistix, version 8.0 (Analytical software, 2003)

ผลการศึกษาและวิจารณ์

การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางฟิสิกส์และเคมี

ความชื้นเริ่มต้นก่อนการทดลองของผักตบชวา มูลแพะ และถ่านชีวภาพมูลแพะมีค่าเท่ากับ 18.2 10.6 และ 5.5% ตามลำดับ ผลวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักของผักตบชวา ได้แก่ สารหนู (As) แคดเมียม (Cd) โครเมียม (Cr) และตะกั่ว (Pb) มีค่าเท่ากับ 0.002 <0.001 0.35 และ <0.003 mg/kg ตามลำดับ จึงสามารถใช้ผลิตปุ๋ยหมักได้เนื่องจากความเข้มข้นของโลหะหนักอยู่ในระดับต่ำ มูลแพะและถ่านชีวภาพมูลแพะมีปริมาณไนโตรเจน (>1%) ฟอสฟอรัส (>0.5%) และโพแทสเซียม (>0.5%) ผ่านมาตรฐานตามเกณฑ์ประกาศของกรมวิชาการเกษตรเรื่องปุ๋ยอินทรีย์ พ.ศ. 2548 ขณะที่ผักตบชวามีเพียงไนโตรเจนเท่านั้นที่ผ่านตามเกณฑ์ ค่าวิเคราะห์ Proximate ของถ่านชีวภาพมูลแพะภายหลังอบตัวอย่างที่ 105 ºC กระทั่งน้ำหนักคงที่ ประกอบด้วย volatile matter fixed C และ ash เท่ากับ 1.8 50.8 และ 47.4% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับมูลแพะก่อนไพโรไลซิสที่มีค่าดังกล่าวเท่ากับ 68.3 2.2 และ 29.5% ตามลำดับ ถ่านชีวภาพมูลแพะมีค่า pH เท่ากับ 8.86 โดยมีสภาพความเป็นด่างเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับมูลแพะสด (8.16) สาเหตุจากปริมาณเถ้าที่เพิ่มสูงขึ้น (≈37.8%) หลังจากการไพโรไลซิสของถ่านมูลแพะ สมบัติทางฟิสิกส์และเคมีบางประการของวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการหมักแสดงดัง **Table 2**

Table 1 Experimental design and composting pile establishment

No.	Treatment	Materials used for composting (kg by wet weight)			Microbial activator (g/compost pile)		C/N ratio by calculation
		WH	GM	GMBC	MA1	MA2	
1	C/N = 30:1	10	20	10	-	-	30.04
2	C/N = 30:1+MA1	10	20	10	100	-	30.04
3	C/N = 30:1+MA2	10	20	10	100	-	30.04
4	C/N = 35:1	11.5	10.5	18	-	-	35.26
5	C/N = 35:1+MA1	11.5	10.5	18	-	100	35.26
6	C/N = 35:1+MA2	11.5	10.5	18	-	100	35.26

WH: water hyacinth. GM: goat manure. GMBC: goat manure biochar. MA = Microbial activator; MA1 = type 1, MA2 = type 2.

Table 2 Some properties of the raw materials used for composting

Material	pH	Chemical composition (%)			
		Oxidizable organic C	Total N	Total P	Total K
Water hyacinth	6.76 ± 0.08	35.89 ± 0.07	1.02 ± 0.01	0.22 ± 0.03	0.28 ± 0.02
Goat manure	8.16 ± 0.03	29.52 ± 0.26	1.34 ± 0.06	0.66 ± 0.04	2.47 ± 0.05
Goat manure biochar	8.86 ± 0.02	49.69 ± 0.73	1.13 ± 0.06	1.21 ± 0.06	3.39 ± 0.11

The number followed by ± indicates the standard deviation.

ภายหลังปรับความชื้นที่ 60% (w/w) ของวัสดุหมักพบว่าส่งผลให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วภายใน 3 วันแรก ความแตกต่างของอุณหภูมิที่มากที่สุดพบในกรรมวิธี C/N = 30/1+MA1 มีค่าเท่ากับ 25.6 °C ขณะเดียวกันมีเพียงกรรมวิธี C/N = 30:1 และ C/N = 30:1 + MA1 ที่ปรากฏช่วงระยะอุณหภูมิที่สูงกว่า 45 °C ระหว่างวันที่ 3-13 อย่างไรก็ตามระยะอุณหภูมิสูง (thermophilic stage) ที่มีค่าสูงกว่า 50 °C พบในกรรมวิธี C/N = 30:1+MA1 เท่านั้น (**Figure 1**) ภายหลังวันที่ 13 ของการหมัก พบว่าอุณหภูมิในกรรมวิธี C/N = 30:1 และ C/N = 30:1+MA1 มีแนวโน้มลดลงที่เด่นชัด และมีระยะอุณหภูมิคงที่ตั้งแต่วันที่ 23 (36.7-37.9 °C) ถึงวันที่ 33 (35.9-37.9 °C) ของการหมัก ในช่วงท้าย (later stages) ของการย่อยสลายพบว่าทุกกรรมวิธีมีอุณหภูมิลดลงกระทั่งใกล้เคียงอุณหภูมิภายนอกตั้งแต่วันที่ 43 แสดงให้เห็นว่าเป็นระยะที่จุลินทรีย์มีกิจกรรมการย่อยสลายวัสดุหมักลดลงจากการผสมคลุกเคล้าเพื่อกลับกองวัสดุหมักร่วมกับการเติมน้ำเพื่อปรับความชื้น ที่อาจส่งผลให้อุณหภูมิของปุ๋ยหมักลดลงอย่างรวดเร็วและไม่เพิ่มขึ้นอีก โดยในวันที่ 43 สิ้นสุดระยะการย่อยสลายเมื่อพิจารณาจากตัวชี้วัดด้านอุณหภูมิ การศึกษานี้ยังแสดงให้เห็นว่ารูปแบบการย่อยสลายวัสดุหมักที่มีถ่านชีวภาพเป็นส่วนผสมมีการลดลงของอุณหภูมิเป็น 2 ระยะในช่วงท้าย คือ ระยะที่ 1 (วันที่ 23-33 ของการหมักปุ๋ย) และระยะที่ 2 (วันที่ 35-49) ซึ่งคาดได้ว่าเกิดจากการปรับตัวของจุลินทรีย์ในการปรับเปลี่ยนการใช้คาร์บอนอินทรีย์เป็นแหล่งอาหารและพลังงานจากผักตบชวาและมูลแพะมาเป็นการใช้คาร์บอนรูปที่ยากต่อการย่อยสลายมากขึ้นที่พบในถ่านชีวภาพมูลแพะ การเพิ่มขึ้นของ total N total P และ total K ในวันที่ 56 ของทุกกรรมวิธียกเว้น total P ภายใต้กรรมวิธี C/N = 30:1+MA1 (**Figure 2**) สามารถอธิบายได้จากการสูญเสียคาร์บอนจากวัสดุหมักระหว่างการย่อยสลายที่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนความเข้มข้นของธาตุอาหาร การเพิ่มขึ้นของ total N มีทิศทางตรงข้ามกับการลดลงของ oxidizable organic C ที่ตรวจวัดได้ ส่งผลให้ค่า C/N ลดลงในทุกกรรมวิธีทดลอง จากการศึกษาของ Huang et al. (2004) พบว่าการเพิ่มขึ้นของไนโตรเจนในปุ๋ยหมักอาจมีสาเหตุจากการตรึงไนโตรเจนจากบรรยากาศโดยจุลินทรีย์บางกลุ่ม จึงมีความเป็นไปได้ที่ความเข้มข้นของ total N ที่เพิ่มขึ้นในกรรมวิธีใส่จุลินทรีย์เชื้อเร่ง พด. 1 ได้แก่ กรรมวิธี C/N = 30:1+MA1 และกรรมวิธี C/N = 35:1+MA1 มีการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้น total N สูงสุดเท่ากับ 20 และ 11.4% เมื่อเทียบกับการใส่ พด. 2 และกรรมวิธีไม่ใส่จุลินทรีย์เชื้อเร่ง

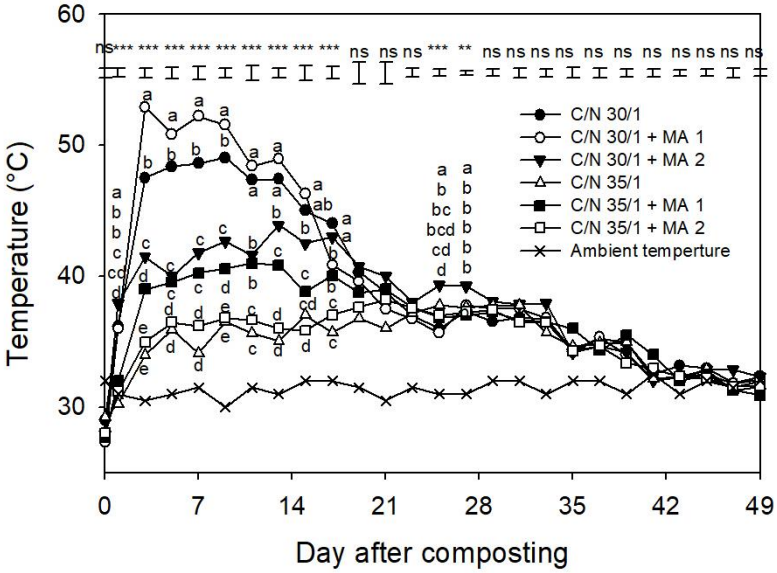

Figure 1 Changes in temperature patterns during composting. The bars represent the standard error of the differences. Means with different letters on the same day indicate significant differences according to LSD.

อิทธิพลของอัตราส่วน C/N เริ่มต้น

การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าทุกกรรมวิธีที่ปรับค่า C/N เริ่มต้นเป็น 30/1 มีแนวโน้มส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยสูงกว่ากรรมวิธีที่ปรับค่า C/N = 35:1 ในระยะเวลา 19 วันแรกของการย่อยสลาย โดยกรรมวิธีที่เติมจุลินทรีย์เชื้อเร่งชนิดที่ 1 (C/N = 30:1 + MA1) ส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 52.9 °C และคงระยะเวลาอุณหภูมิสูง (>50 °C) ได้นานที่สุดเท่ากับ 7 วัน ($P<0.05$) (**Figure 1**) อุณหภูมิที่เพิ่มสูงภายใต้กรรมวิธีดังกล่าวเป็นผลมาจากอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของวัสดุหมักเท่ากับ 30 ต่อ 1 อย่างเด่นชัด ดังเห็นได้ในกรรมวิธี C/N = 30:1 ที่แม้ไม่มีการเติมจุลินทรีย์เชื้อเร่งแต่กลับมีระยะอุณหภูมิสูง (>40 °C) เป็นอันดับสองเมื่อเทียบกับกรรมวิธีที่มีการเติมจุลินทรีย์ (วันที่ 3-9, $P<0.05$) ขณะที่ค่า pH ระหว่างกรรมวิธีที่มีอัตราส่วน C/N ต่างกันส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ในวันที่ 56 เมื่อเทียบกับวันที่ 0 (**Table 4**) ที่มีสาเหตุจากอิทธิพลของค่า C/N เริ่มต้นของวัสดุหมักเช่นเดียวกัน โดยพบว่าทุกกรรมวิธีที่ปรับค่า C/N = 30:1 มีการเพิ่มขึ้นของค่า pH ในวันที่ 56 ซึ่งอาจมีสาเหตุจากการเพิ่มขึ้นของแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ที่เกิดขึ้นได้จากกระบวนการแอมโมนิฟิเคชันระหว่างกระบวนการย่อยสลายสารประกอบไนโตรเจนอินทรีย์ (Haroun et al., 2004; Huang et al., 2004; Dias et al., 2010) สอดคล้องกับการศึกษานี้ที่พบว่าความเข้มข้นของ total N เพิ่มสูงขึ้นประมาณ 16.5-20.2% ในวันที่ 56 ของทุกกรรมวิธีที่ปรับค่า C/N = 30:1 ในทางตรงกันข้ามพบว่าทุกกรรมวิธีที่ปรับค่า C/N = 35:1 ส่งผลให้ค่า pH ของวัสดุหมักลดลงจากวันที่ 0 (8.25-8.30) มีค่าเท่ากับ 8.10-8.20 ในวันที่ 56 สาเหตุของการลดต่ำลงของค่า pH อาจเกิดจากการสูญเสียไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนีย (NH_3) ซึ่งเกิดขึ้นได้เมื่อวัสดุหมักมีความชื้น ทั้งนี้ในวันที่ 56 พบว่าความชื้นเฉลี่ยของวัสดุหมักจากสามกรรมวิธีที่ปรับค่า C/N = 35:1 มีค่าเท่ากับ 20.3% ขณะที่ค่าเฉลี่ยสามกรรมวิธีของ C/N = 30:1 มีค่าเท่ากับ 17.1% มีการศึกษาพบว่าถ่านชีวภาพมีสมบัติในการดูดซับธาตุอาหารพืชแคตไอออนหลายตัว (Joseph et al., 2009) ซึ่งสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของถ่านชีวภาพที่ได้กล่าวมาสามารถมีอิทธิพลต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ได้ (Cheng et al., 2008) จึงอาจเป็นสาเหตุให้กรรมวิธีปรับค่า C/N = 35:1 ซึ่งใช้ถ่านชีวภาพมูลแพะปริมาณสูงเท่ากับ 18 kg มีศักยภาพในการดูดซับไนโตรเจนบางรูปที่ส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ได้ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการปรับค่า C/N ให้เท่ากับ 35:1 มีการใช้ถ่านชีวภาพมูลแพะในปริมาณที่สูงเกือบ 2 เท่าของปริมาณที่ใช้ปรับค่า C/N = 30:1 ซึ่งมีข้อควรพิจารณาโดยเฉพาะอย่างยิ่งค่า pH ที่มีสมบัติเป็นด่างสูงที่จำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมในการปรับปรุงสมบัติบางประการของวัตถุดิบก่อนนำมาใช้ในกระบวนการหมัก

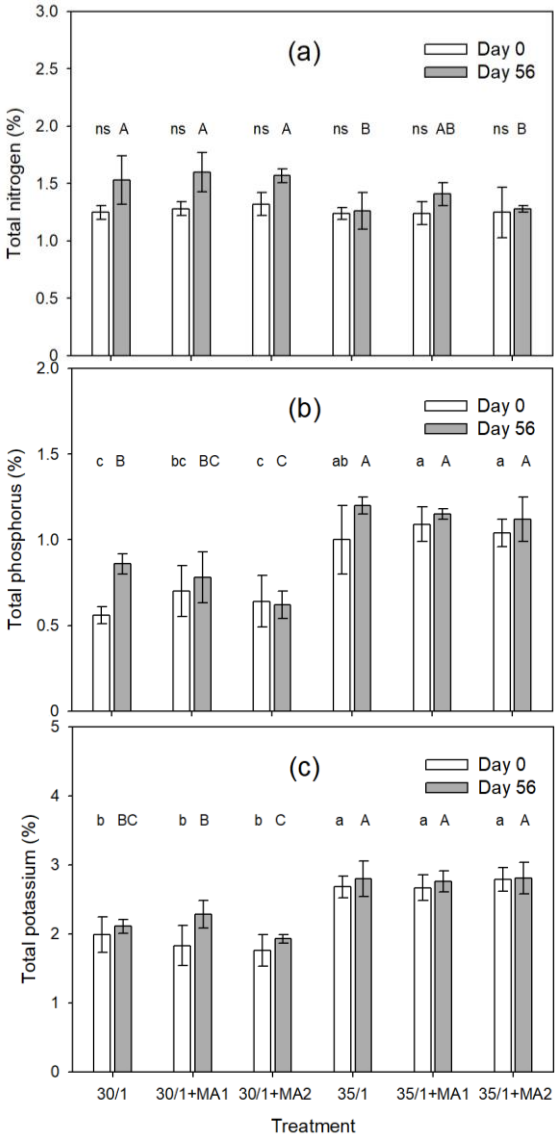

Figure 2 Changes in plant nutrient levels before and after composting. Means for the same parameter on the same day followed by the same letter are not significantly different at $P < 0.05$ (LSD). Vertical bars represent the standard error of the means.

จุลินทรีย์เชื้อเร่งและกิจกรรมบีตา-กลูโคสิเดส

พ.ด. 1 ประกอบด้วยกลุ่มจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายวัสดุทางการเกษตรในการหมักปุ๋ย เช่น *Chaetomium thermophilum Bacillus subtilis และ Streptomyces* sp. เป็นต้น (กรมพัฒนาที่ดิน, 2550) โดยจุลินทรีย์เหล่านี้สามารถสร้างเส้นใยหรือปลดปล่อยพอลิแซ็กคาไรด์เพื่อย่อยสลายวัสดุอินทรีย์ได้ ขณะที่ พ.ด. 2 ประกอบด้วยกลุ่มจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายพืชสดหรือพืชอวบน้ำ (กรมพัฒนาที่ดิน, ม.ป.ป.) การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่ากรรมวิธี C/N = 30:1 หรือ C/N = 35:1 ที่มีการใส่จุลินทรีย์เชื้อเร่งชนิด พ.ด. 1 ส่งผลให้คาร์บอนอินทรีย์ลดต่ำลงได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับกรรมวิธีควบคุมหรือการใส่ พ.ด. 2 บ่งชี้ได้ว่าจุลินทรีย์เชื้อเร่ง พ.ด. 1 เหมาะสมในการใช้ผสมในวัสดุหมักจากผักตบชวา เนื่องจากสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายสารประกอบคาร์บอนอินทรีย์ในวัสดุหมักได้เพิ่มสูงขึ้น ถึงแม้ว่าผักตบชวาเป็นพืชน้ำที่มีรายงานว่าประกอบด้วยเส้นใยที่ดูดซับความชื้นไว้ได้มาก (Ajithram et al., 2020) แต่เนื่องจากการผลิตปุ๋ยหมักเป็นกระบวนการที่จุลินทรีย์ต้องใช้อากาศระหว่างการย่อยสลาย สอดคล้องกับรางานของกรมพัฒนาที่ดิน (ม.ป.ป.) ที่ระบุว่าจุลินทรีย์เชื้อเร่ง พ.ด. 1 ประกอบด้วยเชื้อราและแอคติโนมัยซีทที่ย่อยสารประกอบประเภทเซลลูโลส อย่างไรก็ตามปุ๋ย

หมักที่ผลิตจากวัตถุดิบประเภทพืชน้ำหรือพืชที่มีสมบัติดูดความชื้นได้มาก ควรใช้วิธีปรับความชื้นให้เหมาะสมต่อสภาพการย่อยสลายแบบใช้อากาศ แต่ยังสามารถเลือกใช้จุลินทรีย์เชื้อเร่งประเภทที่ต้องการอากาศอย่างเช่น พ.ด. 1 ซึ่งการใส่จุลินทรีย์เชื้อเร่งชนิดนี้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายสารประกอบคาร์บอนในวัสดุอินทรีย์ให้เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับปุ๋ยหมักที่ไม่มีส่วนผสมของจุลินทรีย์เชื้อเร่ง ทั้งนี้การหมักปุ๋ยที่ไม่มีการใส่จุลินทรีย์เชื้อเร่งควรพิจารณารูปแบบและวิธีการหมักร่วมด้วย ได้แก่ วิธีการตั้งกองปุ๋ย ความถี่ในการกลับกอง และเปอร์เซ็นต์ความชื้นของวัสดุหมัก

กิจกรรมของ β-glucosidase ถูกพิจารณาใช้เพื่อศึกษาศักยภาพในการย่อยสลายวัสดุอินทรีย์ที่มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบ กิจกรรมของ β-glucosidase ภายใต้กรรมวิธี C/N = 35:1 ในวันที่ 0 มีค่าระหว่าง 245.7-266.7 μg *p*-nitrophenol/g compost/h โดยมีค่าสูงกว่าทุกกรรมวิธีที่ปรับค่า C/N = 30:1 (185.3-200.7 μg *p*-nitrophenol/g compost/h) (**Table 4**) โดยกรรมวิธี C/N = 35:1+MA1 มีกิจกรรมของเอนไซม์สูงสุดเท่ากับ 266.7 μg *p*-nitrophenol/g compost/h ($P<0.05$) ขณะที่ในวันที่ 56 พบว่ากิจกรรมของ β-glucosidase เพิ่มขึ้นในทุกกรรมวิธีแต่ไม่พบความแตกต่างทางสถิติ เป็นที่สังเกตเพิ่มเติมว่าในวันที่ 0 ของทุกกรรมวิธีที่ปรับค่า C/N = 35:1 ที่มีการเติมและไม่เติมจุลินทรีย์เชื้อเร่ง ส่งผลให้กิจกรรมของเอนไซม์ชนิดนี้สูงกว่ากรรมวิธี C/N = 30:1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ชี้ให้เห็นว่าการทำงานของจุลินทรีย์มีความจำเพาะต่อ substrate อย่างเช่นเซลลูโลสที่มีรายงานว่าพบในมูลแพะราว 21% (dry weight) (Grimsby et al., 2016) นอกจากนี้ยังอาจรวมถึงเซลลูโลสส่วนที่เกิดการไพโรไลซิสอย่างไม่สมบูรณ์ของถ่านชีวภาพ ได้แก่ ส่วนที่เผาไหม้เป็นถ่านเล็กน้อย หรือส่วนที่เผาไหม้ระดับกลาง (Masiello, 2004) ถึงแม้กรรมวิธีทดลองที่ 1 และ 4 ไม่มีการใส่จุลินทรีย์เชื้อเร่ง แต่พบการเพิ่มของกิจกรรม β-glucosidase ดังแสดงใน **Table 4** ชี้ให้เห็นว่ามีจุลินทรีย์ประจำถิ่น (normal flora) ที่อาจมีการปรับตัวใช้ substrate จากวัสดุอินทรีย์เหล่านี้ โดยจุลินทรีย์ประจำถิ่นที่พบในวัตถุดิบที่ใช้ในการหมัก ได้แก่ ผักตบชวาหรือมูลแพะสด เนื่องจากมีรายงานว่ามูลแพะมีแบคทีเรียประเภทย่อยสลายเซลลูโลส (cellulolytic bacteria) ในปริมาณที่สูง (Zhu et al., 2020) จุลินทรีย์ประจำถิ่นเหล่านี้อาจมีกิจกรรมที่สูงขึ้นจากการเหนี่ยวนำของ substrate ในถ่านชีวภาพมูลแพะได้เช่นเดียวกับผักตบชวาหรือมูลแพะสด สมมติฐานเพิ่มเติมอาจเกิดจากการเติมจุลินทรีย์เชื้อเร่งสองชนิด คือ พด. 1 และพด. 2 ที่ทำหน้าที่ย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ในวัตถุดิบได้ต่างกัน จึงคาดได้ว่าจุลินทรีย์เชื้อเร่งอาจมีปฏิสัมพันธ์ต่อจุลินทรีย์ประจำถิ่นที่เป็นไปในทางส่งเสริมที่ส่งผลต่อกิจกรรมเอนไซม์ระหว่างการย่อยสลายได้อีกเช่นกัน แนวทางศึกษากิจกรรมเอนไซม์ในปุ๋ยหมักต่อไปจึงควรตรวจวัดตามเวลาที่เกิดขึ้นจริงระหว่างการหมักร่วมด้วย

Table 3 Changes in the carbon and nitrogen content of the compost materials

Treatment	Day 0			Day 56			Comparative change of	
	C	N	C/N ratio	C	N	C/N ratio	C and N (%)	
	(%)			(%)			C	N
C/N = 30:1	38.8 ^{b}	1.25	31.0	30.5 ^{c}	1.53 ^{a}	19.93	-21.39	+18.3
C/N = 30:1+MA1	39.3 ^{b}	1.28	30.7	29.9 ^{c}	1.60 ^{a}	18.7	-23.92	+20.0
C/N = 30:1+MA2	39.7 ^{b}	1.32	30.1	32.3 ^{bc}	1.58 ^{a}	20.4	-18.64	+16.5
C/N = 35:1	43.7 ^{a}	1.24	35.2	37.2 ^{a}	1.26 ^{b}	29.5	-14.87	+1.58
C/N = 35:1+MA1	44.3 ^{a}	1.24	35.7	35.4 ^{ab}	1.40 ^{ab}	25.3	-20.09	+11.4
C/N = 35:1+MA2	43.7 ^{a}	1.25	35.0	36.9 ^{a}	1.28 ^{b}	28.8	-15.56	+2.34
| *P* |	***	ns		**	*			
SED	0.96	0.08		1.44	0.11			

\| P \|: Probability. SED: Standard error of the differences. *, **, ***: Significant at the 0.05, 0.01, and 0.001 probability levels, respectively. ns = Not significantly different. Means within a column followed by the same letter are not significantly different at $P \leq 0.05$ (LSD).

Table 4 Changes in moisture content, pH and β-glucosidase activity of the composts

Treatment	Moisture content (%)	pH	β-glucosidase activity

						(µg *p*-nitrophenol/ g compost/ h)
	Day 0	**Day 56**	**Day 0**	**Day 56**	**Day 0**	**Day 56**
C/N = 30:1	59.5	17.8 ^{bc}	7.43 ^{b}	7.50 ^{b}	185.3 ^{c}	243.2
C/N = 30:1+MA1	60.4	17.5 ^{bc}	7.49 ^{b}	7.55 ^{b}	200.7 ^{c}	263.0
C/N = 30:1+MA2	61.9	16.1 ^{c}	7.54 ^{b}	7.58 ^{b}	191.6 ^{c}	272.2
C/N = 35:1	59.3	20.4 ^{a}	8.30 ^{a}	8.10 ^{a}	245.7 ^{b}	262.0
C/N = 35:1+MA1	59.8	19.6 ^{ab}	8.26 ^{a}	8.20 ^{a}	266.7 ^{a}	287.0
C/N = 35:1+MA2	59.1	21.0 ^{a}	8.25 ^{a}	8.10 ^{a}	257.0 ^{ab}	291.7
| *P* |	ns	**	***	***	***	ns
SED	1.29	1.03	0.09	0.11	8.05	16.4

| P | : probability. SED: standard error of the differences. **, *: significant at the 0.1 and 0.001 probability levels, respectively. ns = not significantly different. Means within a column followed by the same letter are not significantly different at P ≤ 0.05 (LSD).

สรุป

การผลิตปุ๋ยหมักจากผักตบชวาร่วมกับมูลแพะและถ่านชีวภาพมูลแพะเมื่อพิจารณาการย่อยสลายจากหลายตัวชี้วัดร่วมกัน ได้แก่ อุณหภูมิ pH กิจกรรมของ β-glucosidase และการสูญเสียคาร์บอนระหว่างการย่อยสลายพบได้ว่าถึงแม้ถ่านชีวภาพมูลแพะมีคาร์บอนอินทรีย์ในปริมาณที่สูง (49.69%) แต่คาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบอาจเป็นรูปที่ออกซิไดส์ได้ง่ายโดยสารเคมี แต่อาจไม่ใช่คาร์บอนในรูปที่จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ได้โดยง่ายทั้งหมด การปรับค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 35:1 ยิ่งส่งผลให้มีการใส่ถ่านชีวภาพมูลแพะในปริมาณสูงคิดเป็นสัดส่วนเท่ากับ 45% จึงส่งผลให้จุลินทรีย์ไม่สามารถใช้ประโยชน์จากสารประกอบคาร์บอนเหล่านี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพหากเทียบกับวัสดุอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ง่ายกว่าอย่างเช่นผักตบชวารวมถึงมูลแพะสด อิทธิพลของการใส่ถ่านชีวภาพมูลแพะปริมาณสูงที่ส่งผลต่อการย่อยสลายยังพบได้ในทุกกรรมวิธีที่ปรับค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 35/1 ที่พบว่าอุณหภูมิช่วง thermophilic เพิ่มขึ้นได้ไม่สูง จึงทำให้การแบ่งระยะ (phase) การย่อยสลายเกิดขึ้นไม่ชัดเจน ทั้งนี้นอกจากการปรับค่า C/N ของวัสดุหมักแล้วยังพบว่าการใช้จุลินทรีย์เชื้อเร่ง พ.ด. 2 ส่งผลต่อรูปแบบการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ได้เช่นเดียวกัน โดยทุกกรรมวิธีที่ใส่จุลินทรีย์เชื้อเร่งดังกล่าวไม่ปรากฏระยะ thermophilic ที่ชัดเจน การใช้จุลินทรีย์ประเภท พ.ด. 2 ในการผลิตปุ๋ยหมักจึงใช้เวลาเพื่อให้จุลินทรีย์ปรับตัวเพื่อย่อยสลายคาร์บอนจากวัตถุดิบ ที่ส่งผลให้การลดลงของคาร์บอนภายใต้กรรมวิธีที่ใส่ พ.ด. 2 ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับการใส่จุลินทรีย์ พ.ด. 1 ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากหลายตัวชี้วัดร่วมกัน ได้แก่ อุณหภูมิ pH ความชื้น ค่า C/N และปริมาณธาตุอาหารพืช จึงสรุปได้ว่าในการผลิตปุ๋ยหมักจากผักตบชวาร่วมกับถ่านชีวภาพมูลแพะควรปรับค่า C/N ให้มีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 30 ต่อ 1 โดยใช้ร่วมกับจุลินทรีย์เชื้อเร่ง พ.ด. 1

คำขอบคุณ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) ประเภท Fundamental Fund ประจำปีงบประมาณ 2567 คณะผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์ฝึกอบรมและวิจัยทางการเกษตร (100 ไร่) มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา ที่ให้ความเอื้อเฟื้อสถานที่ทดลอง และวัสดุอุปกรณ์บางส่วนในการดำเนินการวิจัย ขอขอบคุณ คุณธนภัทร์ ประสาทนอก ผู้ช่วยวิจัยในการจัดเตรียมตัวอย่างและจัดเก็บข้อมูล

เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาที่ดิน. 2550. การผลิตปุ๋ยหมักโดยใช้สารเร่ง ซุปเปอร์ พด.1. แหล่งข้อมูล: http://.www.ldd.go.th/menu_Dataonline/G1/G1_13.pdf. ค้นเมื่อ 1 พฤศจิกายน 2567.

กรมพัฒนาที่ดิน. ม.ป.ป. มหัศจรรย์ พด. แหล่งข้อมูล: http://www1.ldd.go.th/menu_5wonder/index.html. ค้นเมื่อ 1 กรกฎาคม 2567.

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

สินธนา แก้วฝ่ายนอก และภาณุเดชา กมลมานิทย์. 2562. การผลิตถานชีวภาพจากมูลแพะดวยเตาแบบดั้งเดิมเพื่อการเก็บกักคารบอนและเพิ่มธาตุอาหารพืช. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร. 50: 210-216.

Ajithram, A., J. T. W. Jappes, and N. C. Brintha. 2021. Water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) natural composite extraction methods and properties-a review. Materials Today: Proceedings. 45: 1626-1632.

Alef, K., and P. Nannipieri. 1995. Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry. Academic Press, London.

American Standard of Testing Material. 1990. Standard test method for chemical analysis of wood Charcoal. ASTM D 1762-84.

Brodowski, S., B. John, H. Flessa, and W. Amelung. 2006. Aggregates-occluded black carbon in soil. European Journal of Soil Science. 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 factions 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.

Camps, M. 2015. The use of biochar in composting. International biochar initiative. Available: www.biochar-international.org. Accessed Jul.1, 2024.

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 Research. 45: 629-634.

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. Geochimica et Cosmochimica Acta. 72: 1598-1610.

Cornell Waste Management Institute. 1996. Calculate C/N ratio for three materials. Available: https:// compost.css.cornell.edu/calc/2.html. Accessed Jul.19, 2024.

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 Science. 176: 336-345.

Dias, B. O., C. A. Silva, F. S. Higashikawa, A. Roig, and M. A. Sánchez-Monedro. 2010. Use of biochar as bulking agent for the composting of poultry manure: effect on organic matter degradation and humification. Bioresource Technology. 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. Transactions of the 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. Agronomy Journal. 102: 623-633.

Grimsby, L. K., L. Gulbrandsen, L. O. Eik, G. Msalya, and G. C. Kifaro. 2016. The prospect of biogas among small-holder dairy goat farmers in the Uluguru Mountains, Tanzania. African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development. 16: 10723-10737.

Guo, M., W. Song, and J. Tian. 2020. Biochar-facilitated soil remediation: mechanisms and efficacy variations. Frontiers in Environmental Science. 8: article ID 521512.

Hadiyarto, A., D. Soetrisnanto, I. Rosyidin, and A. Fitriana. 2019. Co-digestion of bagasse and water hyacinth for biogas production with variation of C/N and activated sludge. IOP Journal of Physics: Conference Series. 1295: article ID 012050.

Haroun, M., A. Idris, and S. R. Omer. 2004. Composting of tannery sludge with chicken manure and rice bran. Suranaree Journal of Science and Technology. 11: 300-307.

Hass, A., J. M. Gonzalez, I. M. Lima, H. W. Godwin, J. J. Halvorson, and D. G. Boyer. 2012. Chicken manure biochar as liming and nutrient source for acid Appalachian soil. Journal of Environmental Quality. 41: 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. United Kingdoms, Earthscan.

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 Management and Research. 24: 805-813.

Joseph, S., C. Peacocke, J. Lehmann, and P. Munroe. 2009. Developing a biochar classification and test methods. In J. Lehmann and S. Joseph, eds. Biochar for environmental management: science and technology. London, Earthscan.

Kanouo, B. M. D., S. E. Allaire, and A. D. Munson. 2018. Quality of biochars made from eucalyptus tree bark and corncob using a pilot-scale retort kiln. Waste Biomass Valorization. 9: 899-909.

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 and Soil. 333: 117-128.

Masiello, C. A. 2004. New directions in black carbon organic geochemistry. Marine Chemistry. 92: 201-213.

Masto, R. E., S. Kumar, T. Rout, P. Sarkar, J. George, and L. Ram. 2013. Biochar from water hyacinth (*Eichornia crassipes*) and its impact on soil biological activity. Catena. 111: 64-71.

Nakhshiniev, B., C. Perera, M. K. Biddinika, H. B. Gonzales, H. Sumida, and K. Yoshikawa. 2014. Reducing ammonia volatilization during composting of organic waste through addition of hydrothermally treated lignocellulose. International Biodeterioration and Biodegradation. 96: 58-62.

Novak, J. M., I. Lima, B. Xing, J. W. Gaskin, C. Steiner, K. C. Das, M. Ahmedna, D. Rehrah, 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 of Environmental Science. 3: 195-206.

Olsen, S. R., and L. E. Sommers. 1982. Phosphorus. 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, WI.

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.

Sarfaraz, Q., L. Silva, G. Drescher, M. Zafar, F. Severo, A. Kokkonen, G. Molin, M. Shafi, Q. Shafique, and Z. Solaiman. 2020. Characterization and carbon mineralization of biochars produced from different animal manures and plant residues. Scientific Reports. 10: article ID 955.

Sindhu, R., P. Binod, A. Pandey, A. Madhavan, J. A. Alphonsa, N. Vivek, E. Gnansounou, E. Castro, and V. Faraco. 2017. Water hyacinth a potential source for value addition: An overview. Bioresource Technology. 230: 152-162.

Skjemstad, J. O., D. C. Reicosky, A. R. Wilts, and J. A. McGowan. 2002. Charcoal carbon in U.S. agricultural soils. Soil Science Society of America Journal. 66: 1249-1255.

Sukarni, S., Y. Zakaria, S. Sumarli, R. Wulandari, A. A. Permanasari, and M. Suhermanto. 2019. Physical and chemical properties of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) as a sustainable biofuel feedstock. IOP Conference Series: Materials and Science Engineering. 515: article ID 012070.

Torres-Climent, A., J. Martin-Mata, F. C. Marhuenda-Egea, R. Moral, X. Barber, M. D. P. Murcia, and C. Paredes. 2015. Composting of the solid phase of digestate from biogas production: Optimization of the moisture, C/N ratio, and pH conditions. Communications in Soil Science and Plant Analysis. 46: 197-207.

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. International Journal of Agronomy. 2017: article ID 3158207.

Varanasi, J. L., S. Kumari, and D. Das. 2017. Improvement of energy recovery from water hyacinth by using integrated system. International Journal of Hydrogen Energy. 43: 1303–1318.

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 Science. 27: 29-38.

Zhu, Y., L. Merbold, S. Leitner, D. E. Pelster, S. A. Okoma, F. Ngetich, A. A. Onyango, P. Pellikka, and K. Butterbach-Bahl. 2020. The effects of climate on decomposition of cattle, sheep and goat manure in Kenyan tropical pastures. Plant and Soil. 451: 325-343.