

การใช้ถ่านชีวภาพมูลแพะร่วมกับการปรับสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนและการใช้จุลินทรีย์
เชื้อเร่งต่อสมบัติปุ๋ยหมักผักตบชวา

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

ชาชิต กมลมานิทธิ์^{1*}, สุกฤตยา ด่านณรงค์¹, ศิวพร แพงคำ¹, ณัฏฐกิตติยา ไพบูลย์² และ
อัจฉราวดี เครือภักดี³

Chasit Kamolmanit^{1*}, Sukrittaya Dannarong¹, Siwaporn Paengkom¹,
Natthakittiya Paiboon² and Ajcharawadee Kruapukdee³

¹ สาขาวิชาเกษตรศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

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

² สาขาชีววิทยาประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 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 $\mu\text{g p-nitrophenol/g compost/h}$ ในทางเพิ่มเติมกรรมวิธี C/N = 35:1+MA1 ยังมีกิจกรรมของเอนไซม์ β -glucosidase สูงสุดเท่ากับ 266.7 $\mu\text{g p-nitrophenol/g compost/h}$ (P<0.05) การศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าปริมาณการใช้ถ่านชีวภาพมูลแพะในวัสดุหมักเพื่อปรับค่าอัตราส่วน C/N และการเลือกใช้ชนิดของจุลินทรีย์เชื้อเร่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อรูปแบบการย่อยสลายและผลผลิตที่ได้ของวัสดุหมักจากผักตบชวา

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

* 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

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) 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 $\mu\text{g } p\text{-nitrophenol/g compost/h}$ ($P<0.05$). 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^+) เมื่อไออนเหล่านี้ถูกปล่อยจากถ่านออกสู่ดินสามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชที่ปลูกในดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำให้เพิ่มขึ้น (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 สาเหตุหนึ่งที่เกิดจากการประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพเพื่อเป็นส่วนผสมในปุ๋ยหมักมีค่อนข้างน้อย อาจเนื่องจากสมบัติทางโครงสร้างของถ่านที่มีความเสถียรกว่าวัสดุอินทรีย์ตามธรรมชาติ (Skjemstad et al., 2002) แต่ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากมูลสัตว์มีคาร์บอนส่วนที่ต้านทานการย่อยสลายต่ำกว่าวัสดุประเภทไม้ (Guo et al., 2020) และยังมีธาตุอาหารหลักของพืช คือ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมที่สูงกว่าพืชรวมถึงวัสดุทางการเกษตรหลายชนิด (Sarfaraz et al., 2020; สีนธนา 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 (Hadiyanto et al., 2019) ซึ่งค่า C/N ที่ต่ำนี้จะส่งผลให้ไนโตรเจนที่จุลินทรีย์นำไปใช้มีมากเกินไปจึงส่งผลให้ไนโตรเจนบางส่วนถูกปลดปล่อยออกมาในรูปก๊าซแอมโมเนีย (Cornell Waste Management Institute, 1996) ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของการสูญเสียธาตุอาหารไนโตรเจนประการ

หนึ่ง (Nakhshiniev et al., 2014) จากการศึกษาของสินธนาและภานุเดชา (2562) พบว่าถ่านชีวภาพมูลแพะมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบสูงถึง 31.5% จึงมีความเป็นไปได้ในการนำถ่านชีวภาพมูลแพะมาใช้เป็นส่วนผสมเพื่อควบคุมค่า C/N เริ่มต้นของวัสดุหมัก ผักตบชวามีคาร์บอนในรูปเซลลูโลสที่เป็นองค์ประกอบราว 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 ซึ่งช่วยให้คาดการณ์ได้ว่าจะได้ปุ๋ยหมักที่มีคุณภาพตามเกณฑ์กำหนดโดยกรมวิชาการเกษตร (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 ภายในบรรจุบับขนาด กว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ 25 x 25 x 35 cm ได้จำนวน 2 ปีบต่อการผลิต ใช้เวลาเผาประมาณ 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 **Table 1** ภายหลังผสมวัสดุในวันที่ 0 ทำการปรับความชื้นที่ 60% (by weight) และทุกสัปดาห์ วัดอุณหภูมิภายนอก (ambient temperature) และภายในกองวัสดุหมักโดยใช้เทอร์โมมิเตอร์ในวันที่ 0 (~ 3 ชั่วโมงหลังปรับความชื้น) และตรวจวัดอุณหภูมิวันเว้นวันจำนวน 5 จุดจากแต่ละหน่วยทดลองเพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย หักตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นเมื่ออุณหภูมิอยู่ในสภาวะคงที่ (± 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 คาร์บอนอินทรีย์ที่ออกซิไดส์ได้ด้วย ไดโครเมต โดยวิธี 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-กลูโคซิเดส (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 °C จนน้ำหนักคงที่ วิเคราะห์ปริมาณสารระเหย (Volatile matter) โดยเผาที่อุณหภูมิ 950 °C เป็นเวลา 6 นาที วิเคราะห์ปริมาณเถ้า (Ash) โดยเผาที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง กระทั่งน้ำหนักคงที่จากนั้นคำนวณปริมาณคาร์บอนคงตัว (fixed C)

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ข้อมูลจากการวิเคราะห์ของตัวชี้วัดนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (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 °C กระทั่งน้ำหนักคงที่ ประกอบด้วย volatile matter fixed C และ ash เท่ากับ 1.8 50.8 และ 47.4% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับมูลแพะก่อนไฟโรไลซิสที่มีค่าดังกล่าวเท่ากับ 68.3 2.2 และ 29.5% ตามลำดับ ถ่านชีวภาพมูลแพะมีค่า pH เท่ากับ 8.86 โดยมีสภาพความเป็นด่างเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับมูลแพะสด (8.16) สาเหตุจากปริมาณเถ้าที่เพิ่มสูงขึ้น (~37.8%) หลังจากการไฟโรไลซิสของถ่านมูลแพะ 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 ของการหมักพบว่าอุณหภูมิในกรรมวิธี C/N = 30:1 และ C/N = 30:1+MA1 มีแนวโน้มลดลงที่เด่นชัด และมีระยะอุณหภูมิต่ำที่ติดต่อกันที่ 23 (36.7-37.9 °C) ถึงวันที่ 33 (35.9-37.9 °C) ของการหมัก ในช่วงท้าย (later stages) ของการย่อยสลายพบว่าทุกกรรมวิธีมีอุณหภูมิลดลง กระทั่งใกล้เคียงอุณหภูมิภายนอกตั้งแต่วันที่ 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 ลดลงในทุกกรรมวิธี ทดลอง 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

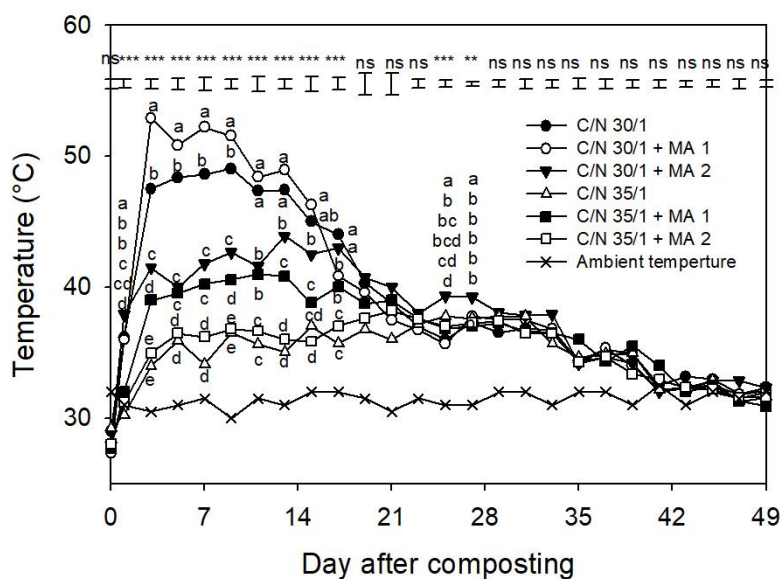


Figure 1 Changes in temperature patterns during composting. The bars represent the standard error of the differences. Means with different letters on the same day indicate significant differences according to LSD.

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) ส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยสูงที่สุดเท่ากับ 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 เพิ่มขึ้นประมาณ 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

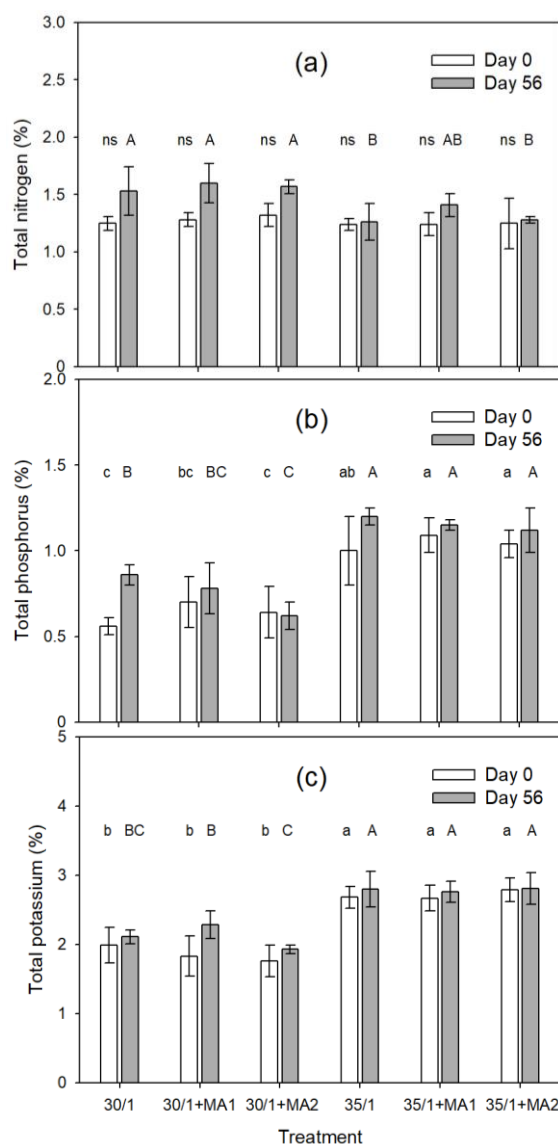


Figure 2 Changes in plant nutrient levels before and after composting. Means for the same parameter on the same day followed by the same letter are not significantly different at $P < 0.05$ (LSD). Vertical bars represent the standard error of the means.

จุลินทรีย์เชื้อร่และกิจกรรมบีตา-กลูโคซิเดส

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 ที่มีการใส่จุลินทรีย์เชื้อร่ชนิด พ.ด. 1 ส่งผลให้คาร์บอนอินทรีย์ลดลงได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับกรรมวิธีควบคุมหรือการใส่ พ.ด. 2 บ่งชี้ได้ว่าจุลินทรีย์เชื้อร่ พ.ด. 1 เหมาะสมในการใช้ผสมในวัสดุหมักจากผักตบชวา เนื่องจากสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายสารประกอบคาร์บอนอินทรีย์ในวัสดุหมักได้เพิ่มสูงขึ้น ถึงแม้ว่าผักตบชวาเป็นพืชน้ำที่มีรายงานว่าประกอบด้วยเส้นใยที่ดูดซับความชื้นไว้ได้มาก (Ajithram et al., 2020) แต่

เนื่องจากการผลิตปุ๋ยหมักเป็นกระบวนการที่จุลินทรีย์ต้องใช้อากาศระหว่างการย่อยสลาย สอดคล้องกับรายงานของกรมพัฒนาที่ดิน (ม.ป.ป.) ที่ระบุว่าจุลินทรีย์เชื้อเร่ง พ.ด. 1 ประกอบด้วยเชื้อราและแอคติโนมัยซีฟที่ย่อยสลายประกอบประเภทเซลลูโลส อย่างไรก็ตามปุ๋ยหมักที่ผลิตจากวัตถุดิบประเภทพีชน้ำหรือพีชที่มีสมบัติดูดความชื้นได้มาก 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 ($P < 0.05$) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการทำงานของจุลินทรีย์มีความจำเพาะต่อ substrate อย่างเช่นเซลลูโลสที่มีรายงานว่าพบในมูลแพะราว 21% (dry weight) (Grimsby et al., 2016) นอกจากนี้ยังอาจรวมถึงเซลลูโลสส่วนที่เกิดการโฟโรไลซิสอย่างไม่สมบูรณ์ของถ่านชีวภาพ ได้แก่ ส่วนที่เผาไหม้เป็นถ่านเล็กน้อย หรือส่วนที่เผาไหม้ระดับกลาง (Masiello, 2004) ถึงแม้กรรมวิธีทดลองที่ 1 และ 4 ไม่มีการใส่จุลินทรีย์เชื้อเร่ง แต่พบการเพิ่มของกิจกรรม β -glucosidase ดังแสดงใน Table 4 ซึ่งชี้ให้เห็นว่ามีจุลินทรีย์ประจำถิ่น (normal flora) ที่อาจมีการปรับตัวใช้ substrate จากวัสดุอินทรีย์เหล่านี้ โดยจุลินทรีย์ประจำถิ่นที่พบในวัตถุดิบที่ใช้ในการหมัก ได้แก่ ผักตบชวาหรือมูลแพะสด เนื่องจากมีรายงานว่ามูลแพะมีแบคทีเรียประเภทย่อยสลายเซลลูโลส (cellulolytic bacteria) ในปริมาณที่สูง (Zhu et al., 2020) จุลินทรีย์ประจำถิ่นเหล่านี้อาจมีกิจกรรมที่สูงขึ้นจากการเหนี่ยวนำของ substrate ในถ่านชีวภาพมูลแพะได้เช่นเดียวกับผักตบชวาหรือมูลแพะสด สมมติฐานเพิ่มเติมอาจเกิดจากการเติมจุลินทรีย์เชื้อเร่งสองชนิด คือ พ.ด. 1 และพ.ด. 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 (μ g <i>p</i> -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 $P \leq 0.05$ (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 ก่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับการใส่จุลินทรีย์ พ.ด. 1 ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากหลายตัวชี้วัดร่วมกัน ได้แก่ อุณหภูมิ pH ความชื้น ค่า C/N และปริมาณธาตุอาหารพืช จึงสรุปได้ว่าการผลิตปุ๋ยหมักจากผักตบชวาร่วมกับถ่านชีวภาพมูลแพะควรปรับค่า C/N ให้มีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 30 ต่อ 1 โดยใช้ร่วมกับจุลินทรีย์เชื้อเร่ง พ.ด. 1

คำขอบคุณ

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

เอกสารอ้างอิง

- กรมพัฒนาที่ดิน. 2550. การผลิตปุ๋ยหมักโดยใช้สารเร่ง ชุปเปอร์ พด.1. แหล่งข้อมูล:
http://www.ddd.go.th/menu_Dataonline/G1/G1_13.pdf. ค้นเมื่อ 1 พฤศจิกายน 2567.
- กรมพัฒนาที่ดิน. ม.ป.ป. มหัทธกรย์ พด. แหล่งข้อมูล: http://www1.ddd.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 แก้วฝายนอก และภาณุเดชา กมลมานิตย์. 2562. การผลิตถ่านชีวภาพจากมูลแพะด้วยเตาแบบดั้งเดิมเพื่อการเก็บกัก
 คาร์บอนและเพิ่มธาตุอาหารพืช. 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 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.
- 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.
- Hadiyanto, 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.
- Safaraz, 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.