

การปรับปรุงคุณภาพวัสดุอินทรีย์เพื่อลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂)สู่บรรยากาศ และส่งเสริมการสะสมคาร์บอนในดินร่วนปนทรายอินทรีย์วัตถุต่ำ

Improving organic residue quality to reduce CO₂ emissions and promote carbon (C) accumulation in a sandy loam soil with low organic matter

ภาณุเดชา กมลมานิต^{1*}

Bhanudacha Kamolmanit^{1*}

บทคัดย่อ: การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการใส่วัสดุอินทรีย์ที่มีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกันในดินต่อการเปลี่ยนแปลงกิจกรรมเอนไซม์หมุนเวียนคาร์บอน (C) ได้แก่ อินเวเตส เบต้ากลูโคซิเดส ฟีนอลออกซิเดส และเปอร์ออกซิเดส และความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมของเอนไซม์กับสมบัติดินบางประการ การทดลองประกอบด้วย 4 กรรมวิธีทดลอง ดังนี้ 1) กรรมวิธีควบคุม 2) ดิน + ฟางข้าว 3) ดิน + ปุ๋ยหมักถั่วเขียว และ 4) ดิน + ถั่วเขียว ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่ากรรมวิธีดิน + ปุ๋ยหมักถั่วเขียวมีกิจกรรมของอินเวเตสสูงกว่ากรรมวิธีอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ตั้งแต่ช่วงกลางจนถึงช่วงท้ายของการย่อยสลาย ($0.17 - 0.29 \text{ mg GE g}^{-1} \text{ soil DW } 3\text{h}^{-1}$) ขณะที่กรรมวิธีดิน + ฟางข้าว มีกิจกรรมของเบต้ากลูโคซิเดสสูงกว่าทุกกรรมวิธีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ตั้งแต่วันที่ 7 หลังการบ่ม ($28.9 - 56 \text{ } \mu\text{g p-nitrophenol g}^{-1} \text{ soil DW h}^{-1}$) บ่งชี้ได้ชัดเจนว่าฟางข้าวมีเซลลูโลสเป็นสารตั้งต้นในปริมาณที่สูง ขณะที่กรรมวิธีดิน + ถั่วเขียว มีกิจกรรมของฟีนอลออกซิเดสเพิ่มขึ้นสูงกว่าทุกกรรมวิธีตลอดระยะเวลาการบ่ม โดยพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในวันที่ 21 42 และ 63 ($P < 0.05$) มีค่าเท่ากับ $0.4 - 0.88$ and $0.67 \text{ } \mu\text{mol dicq g}^{-1} \text{ soil DW h}^{-1}$ ตามลำดับ การศึกษานี้พบความสัมพันธ์ในทางบวกระหว่างไนโตรเจน (N) กับกิจกรรมของอินเวเตสและเบต้ากลูโคซิเดสในช่วงกลางถึงท้ายของการย่อยสลายแต่ไม่พบความสัมพันธ์ทางลบระหว่าง N กับกิจกรรมของเอนไซม์ที่ย่อย C ส่วนที่ยากต่อการย่อยสลาย การศึกษานี้ยังแสดงให้เห็นว่าจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะขาดแคลน C จากวัสดุอินทรีย์เป็นระยะเวลานานโดยเฉพาะในดินที่มีอินทรีย์วัตถุต่ำสามารถถูกเหนี่ยวนำให้ผลิตเอนไซม์ได้จากการใส่ C ที่ยากต่อการย่อยสลายลงในดิน การศึกษานี้พบว่ากรรมวิธีดิน + ปุ๋ยหมักถั่วเขียวส่งผลให้มีค่า $q\text{CO}_2$ ต่ำสุด ($0.078 \text{ mg CO}_2\text{-C g}^{-1} \text{ microbial biomass C d}^{-1}$) สะท้อนการใช้ประโยชน์จากคาร์บอนโดยจุลินทรีย์ได้สูงสุด การศึกษานี้สามารถสรุปได้ว่าปุ๋ยหมักจากถั่วเขียวเหมาะสมที่สุดในการนำมาปรับปรุงดินเนื้อร่วนปนทรายเพื่อเพิ่มการสะสมคาร์บอนในดินที่มีอินทรีย์วัตถุต่ำ

คำสำคัญ: เอนไซม์หมุนเวียนคาร์บอน, อินทรีย์คาร์บอนในดิน, ดินร่วนปนทราย, การปลดปล่อย CO₂, ปุ๋ยหมักถั่วเขียว

Received October 29, 2018

Accepted April 26, 2019

¹ หลักสูตรเกษตรศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา นครราชสีมา 30000

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

* Corresponding author: bhanudacha@yahoo.com

ABSTRACT: The objectives of this study were to investigate patterns of changes with decomposition time of carbon (C)-cycling enzyme activities (i.e., invertase, B-glucosidase, phenoloxidase and peroxidase) in response to fresh addition of contrasting chemical composition organic residues into a sandy soil, and the relations of these microbial activities with some soil properties. The experiment was divided into 4 treatments include the following: 1) control (Untreated soil), 2) Soil + Rice straw, 3) Soil + Biochar compost, and 4) Soil + Biochar. The Soil + BC compost treatment showed significantly ($P < 0.05$) higher invertase activity than the other treatments at the middle to later stages of decomposition ($0.17 - 0.29 \text{ mg GE g}^{-1} \text{ soil DW } 3\text{h}^{-1}$). Results revealed that the Soil + Rice straw treatment showed significantly ($P < 0.05$) higher B-glucosidase activity over the other treatment after 7 day ($28.9 - 56 \text{ } \mu\text{g p-nitrophenol g}^{-1} \text{ soil DW h}^{-1}$) which was a testimony to the distinctly high cellulose substrate of this residue, while Soil + Biochar treatment showed higher phenoloxidase activity at all stages of decomposition. At day 21 42 and 63 after incubation, highest activity of phenoloxidase in the Soil + Biochar treatment also showed highest phenoloxidase activity compared to the other treatments ($P < 0.05$) ($0.4 - 0.88$ and $0.67 \text{ } \mu\text{mol dicq g}^{-1} \text{ soil DW h}^{-1}$, respectively). The positive effect of nitrogen (N) on enzyme activities was seen in the relations of invertase and B-glucosidase at middle to later stages of decomposition. Therefore, there was no negative effect of N on the expression of resistant C compound degrading enzyme activities. We also showed an evident that microorganisms under deprivation of substrate from fresh residue addition for the long term, particularly in a sandy soil may be induced to utilize recalcitrant compounds as C source. In addition, the lowest $q\text{CO}_2$ ($0.078 \text{ mg CO}_2\text{-C g}^{-1} \text{ microbial biomass C d}^{-1}$) under biochar compost-treated soil reflected a high efficiency of C utilization of microbial decomposers. It can be concluded that, among the three residue treatments, biochar compost is the most suitable residue in improving soil organic carbon restoration in a sandy loam soil with low organic matter.

Keywords: carbon (C)-cycling enzymes, soil organic carbon, sandy loam soil, CO_2 emissions, Biochar compost

บทนำ

การใช้ที่ดินเพื่อการเกษตรกรรมอย่างเข้มข้นโดยไม่มีการนำเข้าของธาตุอาหารพืชและอินทรีย์วัตถุเป็นสาเหตุสำคัญที่เร่งการลดลงของอินทรีย์วัตถุที่สะสมในดิน ส่งผลให้เกิดการลดลงของผลผลิตและเพิ่มความเสื่อมโทรมของดินอย่างต่อเนื่องและยังทวีความรุนแรงอย่างเด่นชัดในพื้นที่เขตร้อนที่สภาพภูมิประเทศมีอุณหภูมิสูงและฝนตกชุก (Asio et al. 2009; Schoenholtz et al. 2000) ดินภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยส่วนใหญ่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินต่ำจากการถูกกัดกร่อนและการชะล้างธาตุอาหารออกจากกระบบดินในปริมาณที่สูง (Vityakon, 2007) ส่งผลให้มีการลดลงของอินทรีย์วัตถุในดินอย่างต่อเนื่อง มีหลายการศึกษาพยายามหาทางเพิ่มและรักษาระดับอินทรีย์วัตถุในดินให้คงอยู่ได้นานขึ้น อาทิ การไถเชิงอนุรักษ์ (Plaza et al. 2013) การปลูกพืชหมุนเวียน (Benintende et al. 2008) หรือการใส่วัสดุอินทรีย์ที่

หาได้ในท้องถิ่น (Niemi et al. 2008; Kamolmanit et al., 2013) การศึกษาในปัจจุบันชี้ให้เห็นว่าการนำวัสดุอินทรีย์มาใส่ลงในดินโดยมุ่งเน้นเพื่อสะสมอินทรีย์วัตถุในดินนั้นควรเลือกใช้วัสดุอินทรีย์ที่มี C ส่วนที่ยากต่อการย่อยสลายรวมถึง N ที่สูง (Puttaso et al., 2011a) มีการศึกษาพบว่าใบมะขาม (*Tamarindus indica*) ซึ่งมีปริมาณ N ลิกนิน และโพลีฟีนอลส์เท่ากับ $13.6 - 87.7$ และ 31.5 g kg^{-1} ตามลำดับ สามารถเพิ่มการสะสม C ในดิน และปรับปรุงสมบัติดินบางประการ ได้แก่ การเพิ่มธาตุอาหารพืช การสร้างเม็ดดิน การเพิ่มปริมาณจุลินทรีย์ดิน และสร้างเอนไซม์หมุนเวียน C บางชนิดได้เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการใส่วัสดุอินทรีย์ที่มีองค์ประกอบทางเคมีข้างต้นที่ต่ำ (Kamolmanit et al. 2013; Puttaso et al. 2011a; Puttaso et al. 2011b; Puttaso et al. 2013) การสะสมอินทรีย์วัตถุในดินเป็นผลจากการย่อยสลายวัสดุอินทรีย์โดยจุลินทรีย์โดย C บางส่วนถูกปลดปล่อยออกสู่บรรยากาศในรูปของก๊าซ CO_2 และบางส่วนถูกสะสมในรูป

อินทรีย์วัตถุในดิน ในขั้นตอนการย่อยสลายวัสดุอินทรีย์อาศัยกิจกรรมเอนไซม์หลายชนิด เอนไซม์หมุนเวียน C ที่ได้รับความสนใจศึกษาบทบาทในการหมุนเวียน C ในดิน ได้แก่ อินเวเตส เบต้ากลูโคซิเดส ฟีนอลออกซิเดส และเปอร็อกซิเดส (Kamolmanit et al., 2013; Adetunji et al., 2017) อินเวเตสที่ทำหน้าที่ย่อยสลายซูโครสให้ได้ผลิตภัณฑ์ คือ กลูโคส และฟรุคโตส เบต้ากลูโคซิเดสทำหน้าที่ย่อยสลายเซลโลไบโอสซึ่งเป็นหน่วยย่อยของเซลลูโลสให้ได้กลูโคส ขณะที่ฟีนอลออกซิเดสและเปอร็อกซิเดสย่อยสลายสารประกอบที่ยากต่อการย่อยสลาย เช่น ลิกนิน และโพลีฟีนอลส์ มีการศึกษาพบว่ากิจกรรมของอินเวเตสและเบต้ากลูโคซิเดสสัมพันธ์ในทางบวกกับปริมาณของ N ในวัสดุอินทรีย์และในดิน (Aciego Pietri and Brookes 2009) เนื่องจาก N ทำหน้าที่เป็นตัวจำกัด (limiting factor) การย่อยสลายวัสดุอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ (Blagodatsky et al., 1998; Kochsiek and Knops, 2013) โดย Sinsabaugh et al. (2005) รายงานว่า N สามารถกระตุ้นการย่อยสลายวัสดุอินทรีย์ได้เพิ่มสูงขึ้นได้โดยส่งเสริมการทำงานของเอนไซม์ที่ย่อย C ส่วนที่เปลี่ยนแปลงได้ง่าย (labile C compounds) อาทิ อินเวเตส และเบต้ากลูโคซิเดส ขณะเดียวกันก็มีรายงานที่แสดงว่า N สามารถควบคุมเอนไซม์ที่ย่อย C ส่วนที่ยากต่อการย่อยสลาย (ฟีนอลออกซิเดส และเปอร็อกซิเดส) ทั้งในลักษณะกระตุ้นหรือยับยั้งการแสดงออกของเอนไซม์ได้เช่นเดียวกัน (Carreiro et al. 2000; Sinsabaugh et al. 2005) ทั้ง C และ N ที่พบในวัสดุอินทรีย์จึงทำหน้าที่ควบคุมกิจกรรมของจุลินทรีย์ในการย่อยสลายวัสดุอินทรีย์ที่ส่งผลให้เกิดการสะสมอินทรีย์คาร์บอนในดินได้แตกต่างกัน

ถ่านชีวภาพมี C ส่วนที่ย่อยสลายง่ายและยากแตกต่างกันตามชนิดของวัตถุดิบและสภาวะที่ใช้ในการผลิต (Kamara et al., 2015) ถ่านชีวภาพจึงได้รับความสนใจในการนำมาปรับปรุงดินเพื่อเป้าหมายการเก็บกักคาร์บอนในดิน (C sequestration) อย่างไรก็ตามข้อจำกัดของถ่านชีวภาพ คือ การที่มีปริมาณ N ต่ำกว่าวัสดุที่นำมาใช้เริ่มต้นก่อนการเผา (Zhang et al., 2018) ด้วยสาเหตุดังกล่าวการใส่ถ่านชีวภาพลงในดินโดยตรงจึงอาจส่งผลให้เกิดการดึง N จากดินมาใช้ ส่งผลให้พืชเกิดการขาด N

ดังนั้นการปรับปรุงคุณภาพถ่านชีวภาพโดยนำมาหมักปุ๋ยจึงเป็นแนวทางที่เหมาะสมเนื่องจากมีรายงานว่าสามารถเพิ่ม N และเอนไซม์บางชนิดให้แก่วัสดุหมักได้ (ภาณุเดชา และคณะ, 2561) ปุ๋ยหมักถ่านชีวภาพประกอบด้วยทั้ง C ในรูปที่ย่อยสลายได้ง่ายและยากและ N ที่สูง จึงมีความเป็นไปได้ในการนำไปใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินโดยไม่เกิดผลกระทบต่พืช อย่างไรก็ตามในการศึกษากิจกรรมของเอนไซม์หมุนเวียน C ในดินที่ปรากฏในหลายงานวิจัยยังขาดข้อมูลที่แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมเอนไซม์กับปริมาณ C และ N ที่ตรวจวัดได้จริงตามช่วงเวลา ซึ่งจำเป็นต้องมีการศึกษาเพื่อช่วยให้เข้าใจถึงกระบวนการสร้างและการคงอยู่ของ C ในดินได้ชัดเจนยิ่งขึ้น สมมติฐานของการศึกษานี้ คือ 1) ปุ๋ยหมักถ่านชีวภาพ (C ส่วนที่ยากต่อการย่อยสลายสูง และ N สูง) ช่วยส่งเสริมกิจกรรมของเอนไซม์หมุนเวียน C และเพิ่มศักยภาพของจุลินทรีย์ในการนำมาสร้างเป็นมวลชีวภาพได้สูงกว่าการใส่ถ่านชีวภาพ (C ส่วนที่ยากต่อการย่อยสลายสูงแต่ N ต่ำ) และฟางข้าว (C ส่วนที่ยากต่อการย่อยสลายต่ำ และ N ต่ำ) เพียงอย่างเดียว การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษารูปแบบการย่อยสลายวัสดุอินทรีย์ผ่านทางกิจกรรมของเอนไซม์หมุนเวียนคาร์บอน 4 ชนิด ได้แก่ อินเวเตส เบต้ากลูโคซิเดส ฟีนอลออกซิเดส และเปอร็อกซิเดส ในดินร่วนปนทรายที่ใส่วัสดุอินทรีย์ที่มีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกัน วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมของเอนไซม์ดังกล่าวร่วมกับตัวชี้วัดอื่นเพื่อให้เข้าใจกลไกการย่อยสลายวัสดุอินทรีย์และการสะสม C ในดินตามเวลาที่แท้จริง

วิธีการศึกษา

ดินและวัสดุอินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง

เก็บตัวอย่างดินโดยวิธีสุ่มอย่างง่ายด้วย auger ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 cm จากพื้นที่ศูนย์ฝึกอบรมและวิจัยทางการเกษตร (100 ไร่) มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา ที่ระดับความลึก 0-20 cm สัดส่วน Sand Silt และ Clay เท่ากับ 71.1 12.6 และ 16.3 ตามลำดับ ฟางข้าวได้จากการเก็บเกี่ยวข้าวหอมมะลินามาดัดให้มีความยาวเฉลี่ย 3 cm ถ่านที่ใช้ในการศึกษาผลิตจากไม้ผสม ได้แก่ สะเดา

(*Azadirachta indica*) กระถินพิมาน (*Acacia tomentosa*) จำปา (*Samanea saman*) และมะค่าแต้ (*Sindora siamensis* Miq.) สัดส่วน 70% ชนิดที่ 30% ประกอบด้วย ไม้ประดู่ (*Pterocarpus macrocarpus*) เต็ง (*Shorea roxburghii*) และรัง (*Shorea siamensis*) เฝ้าไม้โดยใช้เตาดินปั้นขนาด กว้าง x ยาว x ลึก เท่ากับ 3 x 3 x 1.8 เมตร ใช้ระยะเวลาในการเผาและอบถ่าน 42 วัน บดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 mm วัสดุอินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย 1) ฟางข้าว (C ที่ง่ายต่อการย่อย

สลายต่ำ และ N ต่ำ) 2) ถ่านชีวภาพล้วน (C ที่ง่ายต่อการย่อยสลายสูง แต่ N ต่ำ) และ 3) ปุ๋ยหมักถ่านชีวภาพ (C ที่ง่ายต่อการย่อยสลายสูง และ N สูง) โดยปุ๋ยหมักถ่านชีวภาพผลิตจากวัสดุผสมระหว่าง ถ่านต่อฟางข้าวเท่ากับ 1 ต่อ 1 (kg: kg dry weight) (ภาณุเดชา และคณะ, 2561) ปั่นหยาบวัสดุอินทรีย์ แล้วร่อนผ่านตะแกรง (2 mm) สมบัติของดินและวัสดุอินทรีย์บางประการแสดงดัง Table 1

Table 1 Some properties of soil and organic materials used in the study

Parameter	Soil	Biochar	Biochar compost	Rice straw
Moisture content (% by weight)	6.2	5.85	24.82	9.6
pH (soil : water = 1: 2.5) (materials : water = 1: 10)	5.4	10.25	7.96	5.9
EC (μ)	179.3	2,235	ND	ND
CEC ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	1.8	16.85	ND	ND
Oxidizable organic C (g kg^{-1})	0.28	65.6	186.25	567
Total N (g kg^{-1})	0.02	0.71	7.89	2.3
C/N ratio	13.5	92.4	23.6	246.5

ND: not determined.

การทดลองในสภาพบ่มและการวางแผนการทดลอง

หน่วยทดลองทำจากพลาสติกใสทรงกระบอกสูง 18 cm เส้นผ่านศูนย์กลาง 7.5 cm บรรจุดิน 1,000 g ต่อหนึ่งหน่วยทดลองให้มีความหนาแน่นเท่ากับ 1.46 g cm^{-3} กรรมวิธีทดลองประกอบด้วย 1) กรรมวิธีควบคุม (ดินที่ไม่ใส่วัสดุอินทรีย์, Untreated soil) 2) ดิน + ฟางข้าว (Soil + Rice straw) 3) ดิน + ปุ๋ยหมักถ่านชีวภาพ (Soil + Biochar compost) และ 4) ดิน + ถ่านชีวภาพ (Soil + Biochar) กรรมวิธีที่ 2-4 คำนวณ C ที่ออกซิไดส์ได้ง่ายของวัสดุอินทรีย์บนฐานน้ำหนักแห้งให้มีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 1 g kg^{-1} soil dry weight คลุกเคล้า

วัสดุอินทรีย์ให้ทั่วทั้งดินและปรับความชื้นดินตลอดการทดลองเท่ากับ 60% water holding capacity ของดินร่วนปนทรายที่ใช้ในการทดลอง ควบคุมอุณหภูมิภายในห้องบ่มที่ 25°C ด้วยเครื่องปรับอากาศตลอดระยะของการบ่ม วางแผนการทดลองแบบ Randomized Complete Block Design (RCBD) โดยจัด Block ในทิศทางเดียวกับการหมุนเวียนอากาศภายในห้องบ่มและขวางทิศทางของแสง

การเก็บตัวอย่างเพื่อการวิเคราะห์และสถิติ

เก็บตัวอย่างดินในวันที่ 0 (3 ชั่วโมง) 3 7 21 42 และ 63 หลังการบ่ม เพื่อวิเคราะห์ตัวชี้วัด

ได้แก่ pH (ดินต่อน้ำเท่ากับ 1: 2.5), C ที่ออกซิไดซ์ได้ด้วยไดโครเมต โดยวิธี wet digestion (Walkley and Black, 1934) Total N โดยวิธี micro kjeldahl ความชื้นโดยวิธี gravimetric method คำนวณเปอร์เซ็นต์ความชื้นเพื่อใช้ในการคำนวณร่วมกับตัวชี้วัดอื่นที่อยู่บนฐานน้ำหนักดินแห้ง วิเคราะห์มวลชีวภาพจุลินทรีย์คาร์บอนโดยวิธีรมคลอโรฟอร์มแล้วสกัดด้วย 0.5 N K_2SO_4 (ดินต่อสารสกัดเท่ากับ 1: 5) แล้วไตเตรตโดยวิธี wet digestion การปลดปล่อย CO_2 โดยวิธี alkaline (1 N NaOH) trapped method รายงานค่าบนฐานของ CO_2 -C ที่ปลดปล่อยต่อกิโลกรัมของน้ำหนักดินแห้งต่อวัน (Rowell, 1997) ศักยภาพการใช้ C (metabolic quotient, qCO_2 -C) คำนวณจากสมการ qCO_2 -C ($mg\ kg^{-1}\ soil\ DW$) = CO_2 -C / microbial biomass C (Anderson and Domsch, 1993) กิจกรรมของอินเวเตสโดยบ่มดินร่วมกับสารละลายซูโครส 50 mM อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 690 nm (Alef and Nannipieri, 1995) กิจกรรมของเบต้ากลูโคซิเดสโดยบ่มดินร่วมกับ 25 mM p-nitrophenyl-B-D-glucoside อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 400 nm (Alef and Nannipieri, 1995) กิจกรรมของฟีนอลออกซิเดสโดยบ่มดินร่วมกับ 5 mM L-3,4-dihydroxy phenylalanine (L-DOPA) และกิจกรรมของเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสโดยใช้สารตั้งต้น L-DOPA ที่มีการเติม 0.3% H_2O_2 (Hendel et al., 2005) วิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-Way ANOVA) ตามแผนการทดลองแบบ RCBD เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Least Significant Difference (LSD) และวิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์ (correlation, r) ระหว่างปัจจัย โดยใช้โปรแกรม Statistix 8.0 (Analytical Software 2003)

ผลการศึกษาและวิจารณ์

กิจกรรมของเอนไซม์หมุนเวียน C ตามช่วงเวลา

ทุกกรรมวิธีที่มีการใส่วัสดุอินทรีย์มีการเพิ่มขึ้นของกิจกรรมเอนไซม์อินเวเตส เบต้ากลูโคซิเดส ฟีนอลออกซิเดส และเปอร์ออกซิเดส สูงกว่ากรรมวิธีควบคุมภายใน 3 ชั่วโมง กิจกรรมเอนไซม์ที่เพิ่มขึ้นตามช่วงเวลาบ่งชี้ว่าวัสดุอินทรีย์มีองค์ประกอบทางเคมีที่เป็นสารตั้งต้นของเอนไซม์ทั้ง 4 ชนิดในปริมาณที่แตกต่างกัน โดยเอนไซม์เหล่านี้ถูกกระตุ้นได้จากวัสดุอินทรีย์ลงไปใหม่ (Kuzakov et al. 2000) และสภาพแวดล้อมในดินที่ส่งผลต่อการทำงานของเอนไซม์ (Sinsabaugh, 1994) ใน 3 วันแรกพบว่ากิจกรรมอินเวเตสเพิ่มสูงขึ้นในกรรมวิธี Soil + Rice straw และ Soil + Biochar และมีแนวโน้มลดลงภายใน 21 วัน ขณะที่กรรมวิธี Soil + Biochar compost กลับพบว่ากิจกรรมของอินเวเตสมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นหลังจาก 21 วัน โดยกรรมวิธี Soil + Biochar compost มีกิจกรรมของเอนไซม์ชนิดนี้สูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ในวันที่ 0 21 42 และ 63 หลังการบ่ม ($0.28\ 0.17\ 0.23$ และ $0.29\ \mu g\ p\text{-nitrophenol}\ g^{-1}\ soil\ DW\ h^{-1}$) (Figure 1a) กิจกรรมของเบต้ากลูโคซิเดสเพิ่มสูงขึ้นในทุกกรรมวิธีที่มีการใส่วัสดุอินทรีย์ลงไปใหม่ภายใน 3 วันแรก โดยกรรมวิธี Soil + Rice straw มีกิจกรรมของเอนไซม์ชนิดนี้สูงสุดและมีความแตกต่างทางสถิติ ($P < 0.05$) ตั้งแต่วันที่ 7 จนกระทั่งสิ้นสุดการบ่ม ($28.9\text{-}56\ \mu g\ p\text{-nitrophenol}\ g^{-1}\ soil\ DW\ h^{-1}$) (Figure 1b) กิจกรรมอินเวเตสและเบต้ากลูโคซิเดสที่สูงภายใต้กรรมวิธีที่ใส่ฟางข้าวซึ่งมี N ต่ำ แสดงให้เห็นว่า substrate ที่มากเกินไปในช่วงแรกเป็นตัวควบคุมการทำงานของเอนไซม์นี้ (Figure 1b) ดังเห็นได้จากการไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมเอนไซม์เหล่านี้กับ N ในช่วงแรก แต่พบว่ามีสหสัมพันธ์ในทิศทางบวกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ในช่วงท้ายของการย่อยสลาย

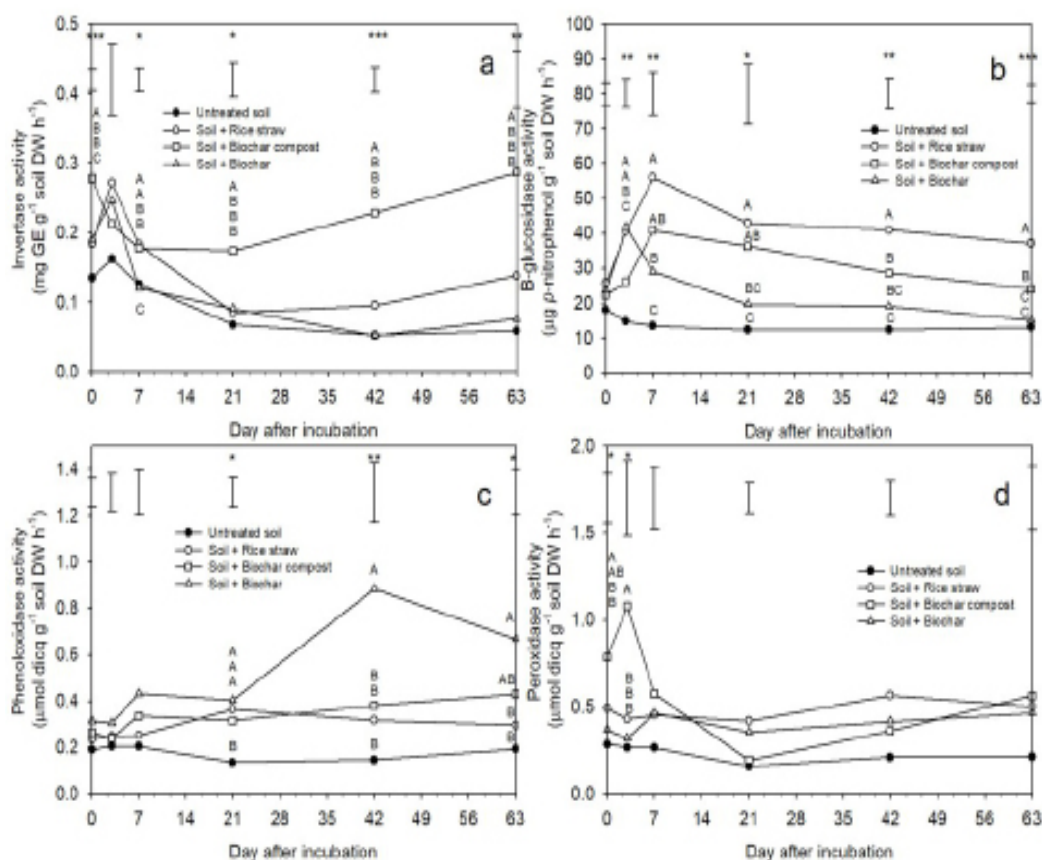


Figure 1 Invertase (a), B-glucosidase (b), phenoloxidase (c), and peroxidase (d) activities in soil treated with contrasting quality organic materials addition. *, **, *** significantly different at $P < 0.05$, 0.01 and 0.001 , respectively.

ผลการศึกษาดังนี้ สอดคล้องกับสมมติฐานการทดลองนี้ คือ N เป็นตัวจำกัดการทำงานของเอนไซม์ที่ย่อยสลาย C ที่ง่ายต่อการย่อยสลาย การทำงานของเอนไซม์กลุ่มนี้เห็นได้อย่างเด่นชัดในดินที่ใส่ปุ๋ยหมักถ่านชีวภาพซึ่งมี N ที่สูง โดยพบว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวเกิดขึ้นในช่วงกลางจนถึงท้ายของการย่อยสลาย สอดคล้องกับการศึกษาของ Song et al. (2013) ที่รายงานว่าการกิจกรรมของอินเวเตสสัมพันธ์ในทางบวกกับปริมาณของ N ทั้งที่พบในดินและวัสดุอินทรีย์ ผลจากการศึกษานี้ยังสอดคล้องกับรายงานในสภาพแปลงทดลองของ Kamolmanit et al. (2013) ที่พบว่ากิจกรรมอิน

เวเตสมีค่าสูงสุดในดินที่ใส่ต้นถั่วลิสงซึ่งมี N สูงสุด เมื่อเทียบกับวัสดุอินทรีย์ประเภทอื่น กิจกรรมของฟีนอลออกซิเดสระหว่างการบ่มดินเพิ่มสูงขึ้นอย่างเด่นชัดในกรรมวิธี Soil + Biochar โดยพบความแตกต่างทางสถิติ ($P < 0.05$) ในวันที่ 21 42 และ 63 วันหลังการบ่ม (0.4 0.88 และ 0.67 $\mu\text{mol dicq g}^{-1}$ soil DW h⁻¹ ตามลำดับ) อย่างไรก็ตามกิจกรรมของเอนไซม์ในกรรมวิธีดังกล่าวมีแนวโน้มคงที่ภายหลังจาก 7 วัน ซึ่งอธิบายได้ว่าถ่านชีวภาพที่เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์หมักนั้นได้ผ่านการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์มาก่อนจากกระบวนการหมักปุ๋ย จึงเป็นสาเหตุให้สารตั้งต้นของเอนไซม์ชนิดนี้คงเหลืออยู่

ในปริมาณที่ต่ำ กรรมวิธี Soil + Rice straw ก็ส่งผลให้กิจกรรมของฟีนอลออกซิเดสมีการแสดงออกที่ไม่เด่นชัดตามช่วงเวลา สาเหตุนี้เนื่องจากฟางข้าวมีลิกนินและโพลีฟีนอลซึ่งเป็นสารตั้งต้นของเอนไซม์ชนิดนี้ในปริมาณที่ต่ำ (28.7 และ 6.5 g kg⁻¹ ตามลำดับ) (Puttaso et al., 2011) การเพิ่มขึ้นของฟีนอลออกซิเดสในดินที่มีการใส่ปุ๋ยหมักถ่านชีวภาพชี้ให้เห็นว่า N ในวัสดุอินทรีย์ไม่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของกิจกรรมเอนไซม์ชนิดนี้ ถึงแม้มีรายงานว่า N ส่งผลยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์ประเภทย่อยสลายลิกนิน (lignin-degrading enzymes) (Berg and Matzner 1997) อย่างไรก็ตามการศึกษานี้ไม่พบความสัมพันธ์ในทางลบระหว่าง N กับฟีนอลออกซิเดส (Table 3) โดย De Forest et al. (2004) และ Gallo et al. (2004) ระบุว่าจุลินทรีย์ประเภทบางชนิดอาจไม่ได้รับผลกระทบจากความเข้มข้นของ N ของวัสดุอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบดินแต่กิจกรรมฟีนอลออกซิเดสสามารถแปรผันได้ตามปริมาณและความหลากหลายของจุลินทรีย์ภายในโครงสร้างประชากรนั้น กิจกรรมเปอร์ออกซิเดสในทุกกรรมวิธีที่มีการใส่วัสดุอินทรีย์มีค่าสูงกว่ากรรมวิธีควบคุมในทุกช่วงระยะเวลาการบ่ม กรรมวิธี Soil + Biochar compost มีกิจกรรมของเอนไซม์ดังกล่าวสูงสุดเท่ากับ 0.79 และ 1.08 $\mu\text{mol dicq g}^{-1} \text{ soil DW h}^{-1}$ ในวันที่ 0 (3 h) และ 3 ของการบ่ม โดยพบความแตกต่างจากกรรมวิธีควบคุมและกรรมวิธี Soil + Biochar อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ขณะที่กรรมวิธี Soil + Rice straw และ Soil + Biochar มีการเพิ่มขึ้นของกิจกรรมเอนไซม์ชนิดนี้ภายหลังจาก 3 วัน โดยพบความแตกต่างทางสถิติ ($P < 0.05$) ในวันที่ 0 3 และ 7 หลังการบ่ม ถึงแม้ว่าดินที่มีการใส่ปุ๋ยหมักถ่านชีวภาพส่งผลให้กิจกรรมเปอร์ออกซิเดสเพิ่มขึ้นสูงอย่างเด่นชัดในช่วงแรกแต่ไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างเอนไซม์ชนิดนี้กับปริมาณ N ในทุกช่วงเวลา ผลการศึกษากิจกรรมเอนไซม์ทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ อินเวเตส เบต้ากลูโคซิเดส ฟีนอลออกซิเดส และเปอร์ออกซิเดส แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของ substrate เป็นปัจจัยหลักที่เหนี่ยวนำให้จุลินทรีย์ผลิตเอนไซม์เพื่อออกมาย่อย

สลายวัสดุอินทรีย์ ขณะเดียวกันปริมาณ N ก็เป็นตัวควบคุมการแสดงออกกิจกรรมของเอนไซม์โดยส่งเสริมการแสดงออกของเอนไซม์บางชนิดเป็นไปในทิศทางบวก (positive effect) หรือไม่มีผลกระทบ (no effect) โดย N สัมพันธ์กับอินเวเตสและเบต้ากลูโคซิเดสในช่วงกลางจนถึงช่วงท้ายของการบ่ม ขณะที่ผลของ N ต่อกิจกรรมของฟีนอลออกซิเดสและเปอร์ออกซิเดสยังคงไม่เด่นชัด อย่างไรก็ตามสามารถเห็นแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่าง N กับฟีนอลออกซิเดสเป็นไปในทิศทางบวกเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม การศึกษานี้ยังแสดงให้เห็นว่าจุลินทรีย์ในดินภายใต้สภาวะขาดแคลนแหล่งอาหาร (C-deprived conditions) สามารถตอบสนองต่อ C ที่ย่อยสลายได้ยากในวัสดุอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบดินได้อย่างรวดเร็วดังเห็นได้จากกิจกรรมฟีนอลออกซิเดสและเปอร์ออกซิเดสที่เพิ่มสูงในดินที่ใส่ถ่านชีวภาพและปุ๋ยหมักถ่านชีวภาพ (Figure 1c, d)

การปลดปล่อย CO₂-C และศักยภาพในการสะสม C ในดิน

การปลดปล่อย CO₂-C และค่าการสะสมคำนวณโดยการลบส่วนต่างจากกรรมวิธีควบคุม การปลดปล่อย CO₂-C ภายหลัง 3 ชั่วโมงของการบ่มในกรรมวิธี Soil + Rice straw มีค่าสูงสุดเท่ากับ 11.7 mg CO₂-C kg⁻¹ day⁻¹ ในกรรมวิธีเดียวกันนี้ยังพบความแตกต่างทางสถิติ ($P < 0.05$) ในวันที่ 3 และ 7 ของการบ่ม (17.3 และ 10.9 mg CO₂-C kg⁻¹ soil⁻¹) (Figure 2a) ขณะที่กรรมวิธี Soil + Biochar และ Soil + Biochar compost มีการลดลงของการปลดปล่อย CO₂-C อย่างรวดเร็วภายหลัง 3 ชั่วโมงและมีแนวโน้มคงที่หลังจากวันที่ 21 จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง การปลดปล่อย CO₂-C สะสม (cumulative CO₂-C) มีค่าสูงสุดในกรรมวิธี Soil + Rice straw โดยพบความแตกต่างทางสถิติ ($P < 0.05$) ตั้งแต่วันที่ 0 จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง (267 mg CO₂-C kg⁻¹ soil⁻¹) ตามด้วยกรรมวิธี Soil + Biochar compost ขณะที่กรรมวิธี Soil + Biochar ส่งผลให้การปลดปล่อย CO₂-C สะสมมีค่าต่ำสุด (Figure

2b) การปลดปล่อย $\text{CO}_2\text{-C}$ ที่สูงในกรรมวิธี Soil + Rice straw สาเหตุมาจากฟางข้าวเป็นวัสดุที่ย่อยสลายได้ง่ายเนื่องจากการมีเซลลูโลสในปริมาณที่สูง (507 g kg^{-1}) (Puttaso et al., 2011) ขณะเดียวกันมวลชีวภาพจุลินทรีย์มีอัตราส่วน C/N ประมาณ 3-4 สำหรับแบคทีเรียและ 11-12 สำหรับเชื้อรา (Coyne, 1999) ดังนั้น C ที่มากเกินไปจึงส่งผลให้จุลินทรีย์นำไปใช้แล้วปลดปล่อยออกสู่บรรยากาศในรูปของ CO_2 มากกว่าการนำไปใช้สร้างชีวมวล ดังนั้นการปรับปรุงสมบัติของวัสดุอินทรีย์ที่มีส่วนผสมของ C ที่ออกซิไดส์ได้ง่ายใน

ปริมาณสูง (ฟางข้าว) ร่วมกับวัสดุอินทรีย์ที่ยากต่อการย่อยสลาย (ถ่านชีวภาพ) จึงเป็นแนวทางลดและชะลอการปลดปล่อย C จากระบบดินได้ ดังเห็นได้จากการศึกษาที่พบว่าปุ๋ยหมักถ่านชีวภาพลดการปลดปล่อย CO_2 จากบรรยากาศและเพิ่มการสะสม C ในดินได้นานขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ด้วยเหตุนี้การใช้ปุ๋ยหมักถ่านชีวภาพจึงเป็นแนวทางปฏิบัติที่ดี (good practice) ในการนำมาใช้ปรับปรุงดินเพื่อรักษาระดับ C ในดินได้นานขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการใส่ฟางข้าวหรือถ่านชีวภาพเพียงอย่างเดียว

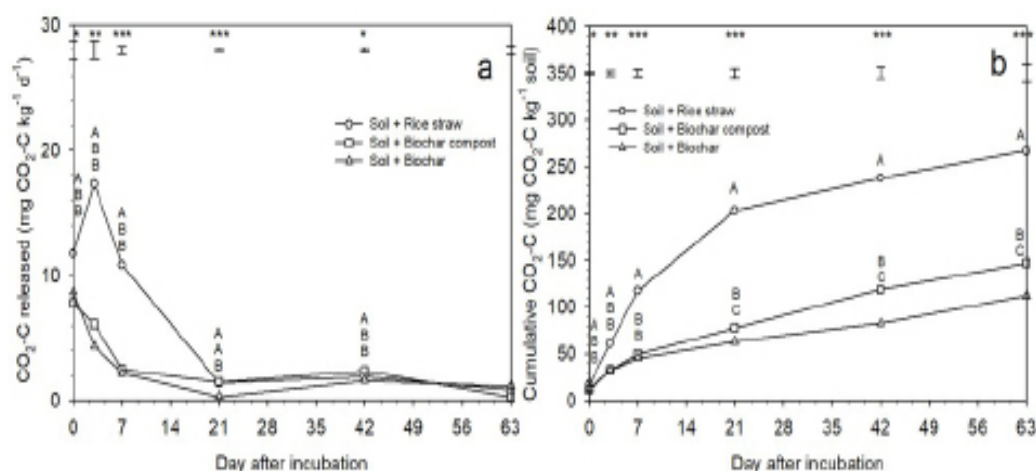


Figure 2 $\text{CO}_2\text{-C}$ released (a) and cumulative $\text{CO}_2\text{-C}$ (b) under contrasting quality organic materials addition. Vertical bars represent SED. *, **, *** significantly different at $P < 0.05$, 0.01 and 0.001 , respectively.

จากการศึกษาของ Puttaso et al. (2011) พบว่าดินที่มีการใส่วัสดุอินทรีย์ที่มี C ส่วนที่ยากการย่อยสลายต่ำ ได้แก่ ฟางข้าว ส่งผลให้เกิดการปลดปล่อย CO_2 จากดินสูงสุดเมื่อเทียบกับวัสดุที่มี C ยากต่อการย่อยสลายสูง ได้แก่ ใบพลวง ดินที่มีการใส่ฟางข้าวจึงมี C สะสมต่ำกว่าดินที่ใส่ใบพลวงความสามารถของจุลินทรีย์ในการนำ C มาสร้างเป็นมวลชีวภาพแสดงในรูปของ C ที่สะสมในมวล

ชีวภาพจุลินทรีย์ (metabolic quotient, $q\text{CO}_2$) กรรมวิธี Soil + Biochar compost มีค่า $q\text{CO}_2$ ต่ำกว่าทุกกรรมวิธีเกือบทุกช่วง ยกเว้นวันที่ 21 โดยพบความแตกต่างทางสถิติ ($P < 0.05$) ในวันที่ 0 (3 h) 3 และ 63 หลังการบ่ม (Table 2) กรรมวิธี Soil + Biochar compost มีค่า $q\text{CO}_2$ ต่ำสุดในทุกช่วงของการบ่ม โดยค่า $q\text{CO}_2$ ที่ต่ำแสดงถึงศักยภาพของจุลินทรีย์ในการนำ C มาใช้สร้างเป็นมวลชีวภาพได้

มากกว่าการปลดปล่อย C ออกสู่บรรยากาศจากการหายใจ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกรรมวิธีที่ใส่วัสดุอินทรีย์พบว่า qCO_2 มีค่าน้อยกว่าตามลำดับในกรรมวิธี Soil + Biochar compost < Soil + Biochar < Soil + Rice straw มีค่าเท่ากับ $0.065 < 0.078 < 0.086 \text{ mg } CO_2\text{-C g}^{-1} \text{ microbial biomass C d}^{-1}$ ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าจุลินทรีย์ภายใต้กรรมวิธีที่มีการใส่ปุ๋ยหมักถ่านชีวภาพมีศักยภาพในการนำ C มาใช้เพื่อสร้างเป็นมวลชีวภาพได้มีประสิทธิภาพสูงสุด ปุ๋ยหมักถ่านชีวภาพลดการ

ปลดปล่อย CO_2 ออกสู่บรรยากาศและส่งเสริมให้จุลินทรีย์นำ C มาใช้สร้างเป็นเซลล์มากกว่าดินที่ใส่ถ่านชีวภาพหรือฟางข้าวเพียงอย่างเดียว การศึกษานี้สามารถยืนยันได้ว่าการใส่วัสดุอินทรีย์ที่ประกอบด้วย C ส่วนที่ยากต่อการย่อยสลายแต่มี N ที่สูงสามารถเพิ่มระยะเวลาเก็บกัก C ในดินได้นานขึ้นโดยการเหนี่ยวนำให้จุลินทรีย์นำ C มาใช้สร้างเป็นมวลได้เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามผลของ N ต่อกิจกรรมของฟีนอลออกซิเดสและเปอร์ออกซิเดส ยังไม่เด่นชัด ซึ่งจำเป็นต้องมีการศึกษาในเชิงลึกต่อไป

Table 2 Metabolic quotient (qCO_2) during microbially decomposition of organic residues

Days after incubation	Metabolic quotient (qCO_2) (mg CO_2 -C g ⁻¹ microbial biomass C d ⁻¹)				P	SED
	Treatment					
	Untreated soil	Soil + rice straw	Soil + biochar	Soil + biochar compost		
0 (3h)	0.149 b	0.127 b	0.096 b	0.259 a	0.002**	0.023
3	0.117 b	0.204 a	0.083 b	0.134 b	0.002**	0.016
7	0.112	0.140	0.119	0.146	0.570	0.028
21	0.105	0.086	0.067	0.107	0.548	0.031
42	0.106	0.089	0.065	0.078	0.217	0.018
63	0.091 bc	0.125 a	0.078 c	0.109 ab	0.040*	0.013

At each sampling date, data followed by the different letter are significantly different at $P < 0.05$.

*, ** significantly different at $P < 0.05$ and 0.01 , respectively.

สรุป

การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่านอกจากชนิดและปริมาณ C แล้ว N ยังเป็นปัจจัยควบคุมการแสดงออกกิจกรรมเอนไซม์ในการย่อยสลายวัสดุอินทรีย์ในดินได้แตกต่างกันตามช่วงเวลา ฟางข้าวเป็นวัสดุที่มีเซลลูโลสสูงเมื่อใส่ลงในดินส่งผลให้เกิดการปลดปล่อย CO_2 ออกสู่บรรยากาศมากแต่สะสม C ในดินได้น้อย ขณะที่ถ่านชีวภาพมี C ในรูปที่ย่อยสลายยากสูง แต่ C ที่เป็นประโยชน์ต่อจุลินทรีย์น้อย จึงเหนี่ยวนำให้การผลิตเอนไซม์บางชนิด อาทิ อินเวเตส และเบต้ากลูโคซิเดสต่ำ ส่งผลให้การย่อยสลายทางชีวภาพเกิดขึ้นได้ต่ำ นอกจากนี้

นี้ทั้งฟางข้าวและถ่านชีวภาพยังมี N ต่ำเมื่อเทียบกับปุ๋ยหมักถ่านชีวภาพ การใส่ปุ๋ยหมักถ่านชีวภาพจึงเหนี่ยวนำให้จุลินทรีย์ให้ผลิตเอนไซม์เพิ่มสูงขึ้นกว่าการใส่วัสดุอินทรีย์เพียงชนิดเดียว ข้อมูลที่ได้จากการศึกษานี้ช่วยให้เข้าใจกลไกการย่อยสลายวัสดุอินทรีย์และพลวัตของ C ในดินได้ชัดเจนขึ้นและนำไปสู่การคัดเลือกวัสดุอินทรีย์ที่หาได้ในท้องถิ่น หรือเป็นแนวทางปรับปรุงวัสดุอินทรีย์เพื่อนำมาใช้ฟื้นฟูดินขาดความอุดมสมบูรณ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ลดการปลดปล่อย CO_2 ออกสู่บรรยากาศและเพิ่มประสิทธิภาพการเก็บกัก C ในดินได้นานเพิ่มขึ้นในรูปแบบของการสะสมในมวลชีวภาพจุลินทรีย์ดิน

Table 3 Pearson correlation coefficients (*r*) relating enzyme activities and selected soil properties.

C-cycling enzyme activities	Day after incubation	Oxidizable C	Total N
Invertase	0 (3h)	0.6310*	0.503
	3	0.6346*	0.3872
	7	0.4523	0.0661
	21	0.3832	0.2392
	42	-0.3827	0.8096***
	63	-0.3650	0.7085***
B-glucosidase	0 (3h)	0.5160	0.3969
	3	0.7989**	0.4298
	7	0.7663**	0.6154*
	21	0.5958*	0.6696*
	42	0.5556	0.0273
	63	0.3197	0.0463
Phenoloxidase	0 (3h)	0.4660	0.1462
	3	0.2741	0.1968
	7	0.4286	0.1081
	21	0.6727*	0.3979
	42	0.6016*	0.3110
	63	0.3197	0.3798
Peroxidase	0 (3h)	0.3870	0.5525
	3	0.4165	-0.2683
	7	0.6512*	-0.2069
	21	0.5917*	0.0185
	42	0.4577	0.0301
	63	-0.342	0.5313
Metabolic quotient (qCO_2)	0 (3h)	-0.642*	-0.5419
	3	-0.9047***	-0.2394
	7	-0.7899**	-0.1634
	21	-0.6151*	-0.4790
	42	-0.2799	-0.4455
	63	0.3239	0.8032*

เอกสารอ้างอิง

ภาณุเดชา กมลมานิทย, ณัฐพงษ์ พานวงษ์ และ พฤกษา หล้าวงษา. 2561. อิทธิพลของ อัตราส่วนถ่านชีวภาพต่อฟางข้าวร่วมกับมูล แพะต่อคุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และ ชีววิทยาของปุ๋ยหมัก. แก่นเกษตร. 46: 843-856.

Aciego Pietri J. C. and P. C. Brookes. 2009. Substrate inputs and pH as factors

controlling microbial biomass, activity and community structure in an arable soil. Soil Biol. Biochem. 41: 1396-1405.

Adetunji, A. T., F. B. Lewu, R. Mulidzi, and B. Ncube. 2017. The biological activities of B-glucosidase, phosphatase and urease as soil quality indicators: a review. J. Soil Sci. Plant Nutr. 17: 794-807.

- Alef, K., and P. Nannipieri. 1995. *Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry: Enzyme Activities*. Academic Press, London.
- Anderson, T. H., and K. H. Domsch. 1993. The metabolic quotient for CO_2 ($q\text{CO}_2$) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. *Soil Biol. Biochem.* 25: 393-395.
- Asio, V. B., R. Jahn, F. O. Perez, I. A. Navarrete, S. M. Jr. Abit. 2009. A review of soil degradation in the Philippines. *Annals of Tropical Research*. 31: 69-94.
- Benintende, S. M., M. C. Benintende, M. A. Sterren and J. J. Bettista. 2008. Soil microbiological indicators of soil quality in four rice rotations systems. *Ecol. Indic.* 8: 704-708.
- Berg, B. and E. Matzner. 1997. Effect of N deposition on decomposition of plant litter and soil organic matter in forest systems. *Environ. Review*. 5: 1-25.
- Blagodatsky, S. A., I. V. Yevdokimov, A. A. Larionova and J. Richter. 1998. Microbial growth in soil and nitrogen turnover: model calibration with laboratory data. *Soil Biol. Biochem.* 30: 1757-1764.
- Carreiro, M. M., R. L. Sinsabaugh, D. A. Repert and D. F. Parkhurst. 2000. Microbial enzyme shifts explain litter decay responses to simulated nitrogen deposition. *Ecology*. 81: 2359-2365.
- Coyne, M. S. 1999. *Soil microbiology: An exploratory approach*. Delmar publishers. New York, U.S.A.
- De Forest, J. L., D. R. Zak, K. S. regitzer, A. J. Burton. 2004. Anthropogenic NO_3^- deposition alters microbial community function in northern hardwood forests. *Soil Sci Soc. Am. J.* 68: 132-138.
- Gallo, M. E., R. Amonette, C. Lauber, R. L. Sinsabaugh, D. R. Zak. 2004. Short-term changes in oxidative enzyme activity and microbial community structure in nitrogen-amended north temperate forest soils. *Microb. Ecol.* 48: 218-229.
- Hendel, B., R. L. Sinsabaugh and J. Marxsen. 2005. Lignin-degrading enzymes: phenoloxidase and peroxidase. In: M.A.S. Graça, F. Bärlocher, and M.O. Gessner. (Eds.). *Methods to study litter decomposition: a practical guide*, Springer, Dordrecht.
- Kamara, A., H. S. Kamara, and M. S. Kamara. 2015. Effect of rice straw biochar on soil quality and the early growth and biomass yield of two rice varieties. *Agric. Sci.* 6: 798-806.
- Kamolmanit, B., P. Vityakon, W. Kaewpradit, G. Cadisch 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.
- Kanerva, S., V. Kitunen, O. Kiikkilä, J. Loponen and A. Smolander. 2006. Response of soil C and N transformations to tannin fractions originating from Scots pine and Norway spruce needles. *Soil Biol. Biochem.* 38: 1364-1374.
- Kochsiek, A. E. and J. M. H. Knops. 2013. Effects of nitrogen availability on the fate of litter-carbon and soil organic matter decomposition. *Br. J. Environ. Clim. Change*. 3: 24-43.
- Kuzyakov, Y., J. K. Friedel and K. Stahr. 2000. Review of mechanisms and quantification of priming effect. *Soil Biol. Biochem.* 32: 1485-1498.

Niemi, R. M., M. Vepsäläinen, K. Wallenius, K. Erkomaa, S. Kukkonen and M. Vestberg. 2008. Conventional versus organic cropping and peat amendment inputs on soil microbiota and their activities. *Eur. J. Soil Biol.* 44: 419-428.