

การปรับปรุงความอุดมสมบูรณ์ของดินทรายโดยใช้สารอินทรีย์: การศึกษาเชิงกระบวนการ

Enhancing fertility of sandy soils through the use of organic materials : process- level investigation

ปัทมา วิทยาการ^{1*}, อรรถพร พุทธิโส¹, สมชาย บุตรนนท์¹, ภาณุเดช กมลมานิตย์¹,
เบ็ญจพร กุลนิตย์¹ และ รติกร แสงหาว¹

บทคัดย่อ: การฟื้นฟูดินเนื้อทรายที่เสื่อมโทรมแนวทางหนึ่งคือ การใช้สารอินทรีย์ที่มีองค์ประกอบทางเคมีหรือคุณภาพที่เหมาะสม บทความนี้มีเป้าหมายเพื่อปริทัศน์ผลงานวิจัยของกลุ่มวิจัยอินทรีย์วัตถุในดิน ที่ได้ทำการศึกษากการใช้สารอินทรีย์ต่างคุณภาพที่หาได้ในท้องถิ่น โดยใส่ลงไปในดินปีละครั้งเป็นเวลากว่า 18 ปี โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา 1) ปัจจัยองค์ประกอบทางเคมีของสารอินทรีย์รวมทั้งด้านชีวภาพ และ 2) กลไกทางชีวภาพ (ปัจจัยสิ่งมีชีวิตผู้ย่อยสลาย) ที่มีผลต่อการสลายตัวและการเปลี่ยนแปลงอินทรีย์วัตถุในดินทราย ได้จำแนกสารอินทรีย์ได้เป็น 4 ชั้นคุณภาพ (สูงถึงต่ำ) โดยใช้ปริมาณขององค์ประกอบของ N, ลิกนินและโพลีฟีนอล รวมทั้งเซลล์ลูโลสเป็นปัจจัยหลัก พางข้าวซึ่งมีเซลล์ลูโลสสูงมีอัตราการสลายตัวที่สูงกว่าใบพลวงซึ่งมีลิกนินและโพลีฟีนอลสูง ทั้งๆ ที่มีอัตราส่วน C/N สูง (80) ใกล้เคียงกัน การสะสมคาร์บอนอินทรีย์ในดิน (SOC) มีสูงที่สุดในสารอินทรีย์ที่มี N, ลิกนินและโพลีฟีนอลปานกลาง ได้แก่ ใบร่วงมะขาม ส่วนพางข้าวมี SOC ต่ำที่สุด เนื่องจากพางข้าวทำให้เกิด DOC ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ซึ่งถูกชะล้างไปจากดินชั้นบน สารอินทรีย์ต่างคุณภาพเหนี่ยวนำให้เกิดประชากรราที่ต่างกัน โดยใบพลวง มีประชากรราแตกต่างจากสารอินทรีย์ชนิดอื่นและกรรมวิธีควบคุม นอกจากนี้กิจกรรมของเอนไซม์ที่ย่อยสลายคาร์บอนอินทรีย์มีความแตกต่างกันในกรรมวิธีที่ใส่สารอินทรีย์ต่างคุณภาพด้วย

ABSTRACT: Restoration of degraded sandy soils can be achieved one way through the use of organic materials with appropriate chemical composition or quality. This review article is aimed at presenting research findings of the research group on soil organic matter which has been investigating the use of contrasting quality organic materials locally available through their yearly application to a sandy soil for more than 18 years. The objectives were to study: 1) Quality factor of various organic materials including biochar, and 2) biological mechanisms (decomposer organisms factor), affecting decomposition and changes in organic matter of sandy soils. Four categories of organic materials used were obtained based on their contents of N, lignin, and polyphenols as well as cellulose. Rice straw (high cellulose content) had higher decomposition rate than dipterocarp leaf litter (high lignin and polyphenol contents) despite their comparable C/N ratios (80). Soil organic C (SOC) accumulation was highest under medium-quality organic material (medium contents of N, lignin and polyphenols), i.e., tamarind leaf litter. Meanwhile, rice straw had the lowest SOC due partly to the fact that it produced high content of low-molecular-weight dissolved organic C (DOC) which were leached from the topsoils. Contrasting quality organic materials induced the occurrence of different fungal communities as indicated by differences in fungal communities under dipterocarp as compared to the other organic material treatments and the control. In addition, enzyme activities involving in breaking down of organic C compounds were different under contrasting organic material quality treatments.

¹ กลุ่มวิจัยอินทรีย์วัตถุในดิน สาขาทรัพยากรที่ดินและสิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

* Corresponding author: patma@kku.ac.th

บทนำ

ดินเกษตรกรรมของภาคตะวันออกเฉียงเหนือส่วนใหญ่เป็นดินที่มีเนื้อทรายร่วนหรือร่วนทราย มีปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินต่ำ ทำให้ดินมีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ ซึ่งอินทรีย์วัตถุในดินเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง เพราะมีผลต่อระดับความอุดมสมบูรณ์ของดิน ตลอดจนคุณสมบัติทางเคมีกายภาพ และชีวภาพของดิน เช่น ช่วยให้นดินมีความสามารถในการดูดซับธาตุอาหารได้มากขึ้น ดินมีโครงสร้างที่ดี และช่วยส่งเสริมการทำงานของจุลินทรีย์ดิน นอกจากนี้ยังเป็นแหล่งสำรองธาตุอาหารโดยเฉพาะธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และกำมะถัน อันจะส่งผลถึงการเจริญเติบโตของพืช ดังนั้นอินทรีย์วัตถุในดินจึงเป็นองค์ประกอบอันหนึ่งของดินที่จะบ่งชี้ให้เห็นคุณภาพของที่ดินทางการเกษตร บทความนี้มีเป้าหมายเพื่อปริทัศน์ผลงานวิจัยของกลุ่มวิจัยกระบวนการสะสมและเปลี่ยนแปลงอินทรีย์วัตถุในดิน สังกัดสาขาทรัพยากรที่ดินและสิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น เพื่อแก้ปัญหาดินทรายที่เสื่อมโทรมและขาดความอุดมสมบูรณ์ ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (และในขณะเดียวกันเป็นการทำให้ดินทำหน้าที่ช่วยลดคาร์บอนในบรรยากาศ ซึ่งได้ดำเนินการมาเป็นเวลา 18 ปี ผลจากงานวิจัยได้ชี้ชัดชัดเจนขึ้นโดยลำดับว่าการแก้ปัญหาดินทรายที่ขาดความอุดมสมบูรณ์ สามารถทำได้โดยการใส่สารอินทรีย์ที่มีคุณภาพหรือองค์ประกอบทางเคมีต่างๆ (Vityakon et al., 2000; Puttasso et al., 2011; Samahadthai et al., 2010) สารอินทรีย์เหล่านี้ช่วยเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดินได้เนื่องจากเกิดกระบวนการสลายตัว (decomposition) ขึ้นในดิน เราสามารถใช้แนวคิดเชิงระบบ มาเป็นฐานในการวิเคราะห์เนื้อหาการศึกษาวิจัยของกลุ่มวิจัยนี้ดังกรอบแนวคิดที่เสนอต่อไป

กรอบแนวคิดของการวิจัยเชิงกระบวนการด้านการสะสมและเปลี่ยนแปลงอินทรีย์วัตถุในดินทรายที่ได้รับสารอินทรีย์

ระบบดิน (soil system) มีระบบย่อยได้แก่ ระบบการย่อยสลาย (decomposition subsystem) ซึ่งการ

ย่อยสลายได้รับอิทธิพลจากปัจจัยที่สำคัญ 3 ชนิด ได้แก่ คุณภาพของสารอินทรีย์ (quality หรือ Q) ได้แก่ องค์ประกอบทางเคมี และคุณสมบัติทางกายภาพ ของสารอินทรีย์, สิ่งมีชีวิตที่ทำการย่อยสลาย ทั้งสัตว์และจุลินทรีย์ดิน (organisms หรือ O) และสภาพแวดล้อมทางกายภาพและเคมี (physicochemical environment หรือ P) เช่น อุณหภูมิ เนื้อดิน ความชื้นดิน และ pH ของดิน เป็นต้น ปัจจัยเหล่านี้ต่างมีปฏิสัมพันธ์หรือมีอิทธิพลซึ่งกันและกันในการทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ ในระบบย่อยการย่อยสลายซากอินทรีย์มีซากอินทรีย์ชนิดต่างๆ เข้าสู่ระบบดินที่มีคุณภาพแตกต่างกันไป แล้วแต่ระบบนิเวศ นอกจากนี้ถ่านชีวภาพ (biochar – BC) ก็จัดเป็นสารอินทรีย์ที่พบในระบบดินอีกประเภทหนึ่งที่อาจถือกำเนิดจากการเผาพื้นที่ หรือการใส่เป็นสารปรับปรุงดิน ถ่านมีคุณสมบัติที่ต้านทานการย่อยสลาย สำหรับสิ่งมีชีวิตในดิน ทั้งสัตว์และจุลินทรีย์ดิน เป็นปัจจัยการย่อยสลายที่มีบทบาทสำคัญยิ่ง ชนิดของจุลินทรีย์หรือประชากร (microbial communities) เช่น แบคทีเรีย แอคติโนมัยซีด หรือเชื้อรา ต่างมีหน้าที่ต่างกันในการย่อยสลาย และได้รับอิทธิพลจากปัจจัยการย่อยสลายอื่นๆ ได้แก่ Q และ P ต่างกัน เช่น เป็นที่ทราบว่าการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีสารต้านทานการย่อยสลายได้ดี ในขณะที่แบคทีเรียมักย่อยสลายสารที่เปลี่ยนแปลงง่าย (labile compounds) กระบวนการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ ประกอบด้วยการที่จุลินทรีย์ปลดปล่อยเอนไซม์ที่ catalyze การย่อยสลายออกมานอกเซลล์ (exogenous enzymes) การวัดปริมาณของเอนไซม์จึงเป็นตัวชี้กิจกรรมจุลินทรีย์ได้ทางหนึ่ง ผลกระทบจากการย่อยสลายได้แก่ 1) อินทรีย์วัตถุของดิน 2) ธาตุอาหารรูปอนินทรีย์ และ 3) ก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ (gaseous carbon) ต่างๆ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และมีเทน (CH₄) สำหรับผลิตภัณฑ์ประเภทที่ 2 และ 3 เกิดจากกระบวนการ mineralization ซึ่งเป็นกระบวนการภายในกระบวนการย่อยสลาย หรือเรียกว่าเป็น subset ของกระบวนการย่อยสลาย ซึ่งช่วยให้ธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อพืชและจุลินทรีย์ เช่น ไนโตรเจนอินทรีย์ เกิดจากการดอมีโนถูกเปลี่ยนรูปเป็นแอมโมเนียมและไนเตรต เป็นต้น

ส่วนอินทรีย์วัตถุของดิน (soil organic matter – SOM) ที่เกิดขึ้นแบ่งประเภทได้ตามอัตราการเปลี่ยนแปลงหรือระยะเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลง (turnover time) จึงแบ่งได้เป็นรูปที่เปลี่ยนแปลงเร็วหรือมี turnover time ที่สั้น (labile SOM pool) และรูปที่เปลี่ยนแปลงได้ช้าหรือมี turnover time ที่ยาวนาน เรียกได้ว่าเป็นรูปที่เสถียร (stable SOM pool) (Fig. 1) เช่น ฮิวมัสในส่วนที่เป็นสารฮิวมิก และถ่านในดิน ส่วนอินทรีย์วัตถุที่ละลายน้ำได้ (dissolved organic matter – DOM) จัดเป็นรูปที่เปลี่ยนแปลงง่าย เพราะเป็นสารโมเลกุลเล็กและไม่ซับซ้อน ทำให้จุลินทรีย์เข้าย่อยสลายนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานและอาหารได้ง่าย DOM เคลื่อนที่ได้มากในดิน โดยเฉพาะดินทราย ทำให้สามารถถูกชะล้างลงสู่ส่วนล่างของหน้าตัดดินที่ลึกหรือสู่น้ำใต้ดินได้ ดังนั้นจึงควรศึกษาให้ทราบว่า DOM เมื่อเกิดขึ้นแล้วเดินทางไปยังแหล่งใด หรือ fate ของอินทรีย์วัตถุของดินประเภทนี้ เพราะจะมีผลต่อการสะสม SOC และสภาพแวดล้อมได้ DOM ประกอบด้วย dissolved organic C (DOC) และ dissolved organic N (DON) (Fig. 1) เนื่องจากการสลายตัวของสารอินทรีย์ในดินที่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์ และการสะสม SOM ในดินเป็น

กระบวนการทางชีวภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเป็นกระบวนการที่จุลินทรีย์มีบทบาทอย่างสำคัญที่สุด โดยปัจจัยจุลินทรีย์มีปฏิสัมพันธ์กับปัจจัยคุณภาพสารอินทรีย์ในกระบวนการสลายตัว ดังนั้นองค์ความรู้ด้านกลไกทางชีวภาพที่ทำให้เกิดการสลายตัวและสะสม SOM ในดิน การเกิด DOM และการปลดปล่อยธาตุอาหารจึงเป็นสิ่งเป็นประเด็นที่ควรวิจัยเพื่อให้เกิดความเข้าใจ

วัตถุประสงค์ของบทความเพื่อปริทัศน์ผลงานวิจัยด้านการใช้สารอินทรีย์ต่างคุณภาพในการปรับปรุงดินทราย โดยเน้นที่กระบวนการสลายตัวของสารอินทรีย์ที่ประกอบด้วยปัจจัยและกระบวนการต่างๆ ที่นำไปสู่การปรับปรุงคุณสมบัติของดินในด้านกายภาพ เคมี และชีวภาพ โดยมีวัตถุประสงค์จำเพาะเพื่อปริทัศน์ผลงานวิชาการและผลงานของกลุ่มวิจัยในสาขาที่เกี่ยวข้องดังนี้

1. ปัจจัยองค์ประกอบทางเคมี (คุณภาพ) สารอินทรีย์ที่มีผลต่อกลไกการสลายตัวของสารอินทรีย์ต่างๆ
2. กลไกทางชีวภาพ เน้นที่หน้าที่และชนิดประชากรจุลินทรีย์ ในการเปลี่ยนแปลงและการสะสม (เก็บกัก) อินทรีย์วัตถุในดินทราย ที่ได้รับสารอินทรีย์ต่างคุณภาพมาอย่างยาวนาน

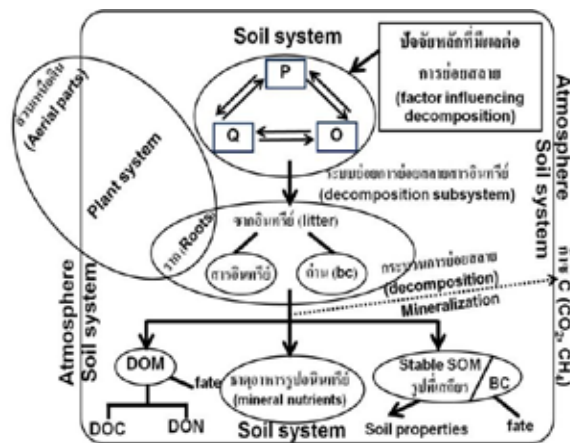


Figure 1 Conceptual framework of the research.

Remarks: Factors influencing decomposition: P = physicochemical factor, Q = quality factor, O = organisms DOM = dissolved organic matter, DOC = dissolved organic carbon, DON = dissolved organic nitrogen $\rightleftharpoons$ Interaction, BC = biochar or charcoal

การจำแนกสารอินทรีย์ตามเกณฑ์องค์ประกอบทางเคมีเพื่อใช้ในการจัดการความอุดมสมบูรณ์ธาตุอาหารไนโตรเจนในดิน

สารอินทรีย์แต่ละชนิดมีความสามารถในการย่อยสลายและปลดปล่อยไนโตรเจนได้แตกต่างกันขึ้นอยู่กับปัจจัยอันหนึ่งคือ คุณภาพหรือองค์ประกอบทางเคมี ทำให้มีการแบ่งประเภท หรือชั้นคุณภาพของสารอินทรีย์ขึ้น เพื่อใช้ในการแนะนำการจัดการสารอินทรีย์ประเภทต่างๆ เพื่อนำมาปรับปรุงดิน โดย Palm et al. (2001) พิจารณารูปแบบการปลดปล่อยไนโตรเจนแล้วแบ่งสารอินทรีย์ได้เป็น 4 ชั้นคุณภาพ โดยใช้เกณฑ์องค์ประกอบทางเคมีของสารอินทรีย์ ได้แก่ ปริมาณไนโตรเจน, ลิกนิน และโพลีฟีนอล เป็นเกณฑ์หลัก กล่าวคือ ในสองชั้นคุณภาพแรก (I และ II) สารอินทรีย์ที่มี % N สูงคือ >2.5 % ความแตกต่างของชั้น I และ II อยู่ที่ปริมาณลิกนินและโพลีฟีนอล หากมีลิกนิน >15% และโพลีฟีนอล >4% จัดเป็นชั้น I หากมีน้อยกว่าจัดเป็นชั้น II ในทางตรงกันข้ามสารอินทรีย์ที่มี %N < 2.5 % ถูกจัดให้อยู่ในชั้นคุณภาพที่ต่ำลงไป (ชั้น III และ IV) โดยหากมีลิกนิน <15% เป็นชั้น III และหากมีลิกนิน >15% จัดเป็นชั้น IV การใช้สารอินทรีย์ในชั้นคุณภาพต่างๆ ในการปรับปรุงดินจะแตกต่างกันกล่าวคือ ชั้น I สามารถใช้เป็นแหล่ง

ไนโตรเจนได้ทันทีโดยจะปลดปล่อย N ทันทีที่ใส่ลงดิน ส่วนชั้น II สามารถใช้เป็นแหล่งไนโตรเจนโดยผสมกับสารอินทรีย์ที่มีไนโตรเจนสูงก่อนใส่ลงไปในดิน สำหรับชั้น III สามารถนำมาผสมกับปุ๋ยเคมีหรือทำปุ๋ยเพื่อชะลอการปลดปล่อยไนโตรเจน ส่วนชั้น IV ควรนำมาคลุมหน้าดินเพื่อป้องกันการกร่อนดินและรักษาความชื้นดิน ดังนั้นการสรรหาสารอินทรีย์ที่มีความเหมาะสมในการปรับปรุงดินจึงเป็นแนวทางการวิจัยอันหนึ่งเพื่อให้ได้ผลในการปรับปรุงความอุดมสมบูรณ์ของดิน

การศึกษาของกลุ่มวิจัยนี้ได้นำสารอินทรีย์ที่หาได้ในท้องถิ่นที่มีคุณภาพต่างกัน (ตารางที่ 1) มาทำการวิจัยด้านการสลายตัวและผลต่อคุณสมบัติของดินทราย ชากต้นและใบถั่วลิสง (groundnut stover) ซึ่งจัดว่ามีคุณภาพสูง กล่าวคือมี N สูงแต่มีลิกนินและโพลีฟีนอลต่ำ, ใบ (+ก้าน) มะขามร่วง (tamarind) จัดว่ามีคุณภาพปานกลาง (มี N, ลิกนินและโพลีฟีนอลปานกลาง), ใบพลวงร่วง (dipterocarp) จัดว่ามีคุณภาพต่ำ (มี N ต่ำ แต่มีลิกนินและโพลีฟีนอลสูง), และฟางข้าว (rice straw) ซึ่งมีคุณภาพที่แตกต่างออกไป กล่าวคือ มีองค์ประกอบทั้งสามต่ำ แต่มีเซลลูโลสสูงที่สุด

Table 1 Chemical quality characteristics of organic residues locally available in Northeast Thailand.

Chemical compositions	Groundnut	Tamarind	Rice straw	Dipterocarp
C (g kg ⁻¹)	388	427	367	453
N (g kg ⁻¹)	22.8	13.6	4.7	5.7
C/N ratio	17.1	31.5	78.4	79.5
Lignin (g kg ⁻¹)	67.6	87.7	28.7	175.5
Polyphenol (g kg ⁻¹)	12.9	31.5	6.5	64.9
Cellulose (g kg ⁻¹)	178	143	507	306

กระบวนการสลายตัวของสารอินทรีย์ต่างคุณภาพอันส่งผลให้เกิดการปลดปล่อยธาตุอาหารและการสะสมอินทรีย์วัตถุในดิน

กลุ่มวิจัยได้ทำการศึกษากลุ่มของสารอินทรีย์ต่างคุณภาพที่หาได้ในท้องถิ่นดังแสดงใน Table 1 ต่อการปลดปล่อยธาตุอาหารเน้นที่ธาตุอาหารหลักไนโตรเจนและการสะสมอินทรีย์วัตถุในดินทราย โดยทำต่อเนื่องกันเป็นการทดลองภาคสนาม (field experiment) ระยะยาว ผ่านการใส่สารอินทรีย์ด้วยการสับกลบในอัตรา 10 ตัน / เฮกตาร์ ที่ความลึกประมาณ 20 ซม. เป็นประจำทุกปี ปีละครั้ง เริ่มตั้งแต่ปี 2538 เป็นต้นมา ในปีที่ 13 (2550) ได้ทำการศึกษาการสลายตัวของสารอินทรีย์เหล่านั้นโดยใช้เทคนิคถุงตาข่าย (litter bag technique) ซึ่งมีขนาดรูเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 มม. โดยได้วัดน้ำหนักแห้งที่เหลืออยู่ในถุงตาข่ายจากการเก็บตัวอย่างสารอินทรีย์ในถุงตาข่ายเป็นช่วงๆ ได้แก่ 0, 1, 2, 4, 8, 16, 26, และ 52 สัปดาห์ หลังฝังถุงตาข่ายที่ใส่สารอินทรีย์ จากการใช้ double pool model ของการสลายตัว ทำให้สามารถแยกอัตราการสลายตัวออกเป็น 2 ช่วง (Fig. 2) คือ ช่วงแรก (1-4 สัปดาห์) และช่วงหลัง (8-52 สัปดาห์) ของการสลายตัว พบว่าสารอินทรีย์ทุกชนิดมีอัตราการสลายตัวอย่างรวดเร็วในช่วงแรก สะท้อนให้เห็นว่าปริมาณของคาร์บอนในส่วนที่สลายตัวง่าย (labile C) ถูกทำให้สลายตัวและนำไปใช้เพื่อดำเนินกิจกรรมของจุลินทรีย์ดินเห็นได้จากปริมาณของการปลดปล่อย CO_2 เกิดขึ้นสูงในช่วงแรก Urquiga et al. (1998) พบว่า อัตราการสลายตัวของสารอินทรีย์ขึ้นอยู่กับสารประกอบคาร์บอนโดยเฉพาะในส่วน of labile C ซึ่งเห็นได้จากอัตราการสลายตัวสูงของฟางข้าว จากผลนี้จะเห็นได้ว่าถึงแม้ฟางข้าวมี C/N สูง (78) แต่มีการสลายตัวสูงเมื่อเทียบกับใบพลวง (C/N เท่ากับ 80) และใบมะขาม (C/N เท่ากับ 32) จากปริมาณการปลดปล่อย CO_2 ของฟางข้าวที่สูงและสูงกว่าใบมะขามและใบพลวงเนื่องจากว่าในฟางข้าวมีความเข้มข้นของเซลลูโลสสูง (507 g kg^{-1}) และ

เซลลูโลสเป็นสารประกอบ C ที่สลายตัวง่าย นอกจากนี้ยังพบสหสัมพันธ์ในทางบวกระหว่างอัตราการสลายตัวในช่วงแรก (k_1) กับความเข้มข้นของเซลลูโลส ($r = 0.698^*$) ผลข้างต้นชี้ว่าการใช้อัตราส่วนของ C/N ของสารอินทรีย์เพียงปัจจัยเดียวไม่เพียงพอในการทำนายของอัตราการสลายตัว Hada et al. (2004) พบว่าถึงแม้สารอินทรีย์ (ซากข้าวโพด) ที่มี C/N สูงกว่าถึง 2-3 เท่าเมื่อเทียบกับกากของผลองุ่น และใบยาสูบแต่กลับพบว่าอัตราการสลายตัวใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ในการศึกษาของเรายังพบว่าอัตราการสลายตัวในช่วงหลัง (หลังจากสัปดาห์ที่ 8) มีสหสัมพันธ์ทางลบกับ C ในสารอินทรีย์ซึ่งสะท้อนบทบาทของ C ส่วนที่ต้านทานการสลายตัวได้แก่ ลิกนิน และโพลีฟีนอล ในช่วง 8-52 สัปดาห์หลังใส่สารอินทรีย์พบว่าอัตราการสลายตัว (k_2) ช้าเมื่อเทียบกับช่วงแรก (k_1) โดยได้รับอิทธิพลจากองค์ประกอบทางเคมีของสารอินทรีย์ได้แก่ ปริมาณลิกนินและโพลีฟีนอล ซึ่งแสดงว่าในช่วงนี้ปริมาณของ labile C เหลือน้อยมาก ทำให้ความเข้มข้นของ C ส่วนที่ต้านทานการสลายตัวเพิ่มมากขึ้นจึงเป็นตัวจำกัดการสลายตัวในช่วงหลัง ซึ่งสอดคล้องกับงานทดลองอื่นๆ ที่ผ่านมา (Thomas and Asakawa, 1993) ซึ่งปริมาณลิกนิน และโพลีฟีนอลเริ่มต้นเป็นปัจจัยที่จำกัดและมีบทบาทต่ออัตราการสลายตัวของสารอินทรีย์ (Muller et al., 1998) จากผลสหสัมพันธ์ในทางลบระหว่างอัตราการสลายตัวในช่วงนี้ (k_2) กับลิกนิน และโพลีฟีนอลสะท้อนให้เห็นว่าสารประกอบดังกล่าวเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสลายตัวในช่วงหลังโดยเฉพาะสารอินทรีย์ที่มีปริมาณลิกนินและโพลีฟีนอลสูง ได้แก่ ใบพลวง ในกรณีของฟางข้าวยังคงพบว่ามีอัตราการสลายตัวสูงในช่วงหลัง (k_2) เช่นเดียวกับช่วงแรก (k_1) จากเหตุผลข้างต้นสนับสนุนว่าสารอินทรีย์ที่มีปริมาณลิกนิน และโพลีฟีนอลต่ำจะเกิดการสลายตัวเร็ว ประกอบกับสารประกอบคาร์บอนส่วนใหญ่เป็นเซลลูโลสซึ่งสลายตัวได้ง่ายกว่าเมื่อเทียบกับลิกนินและโพลีฟีนอล

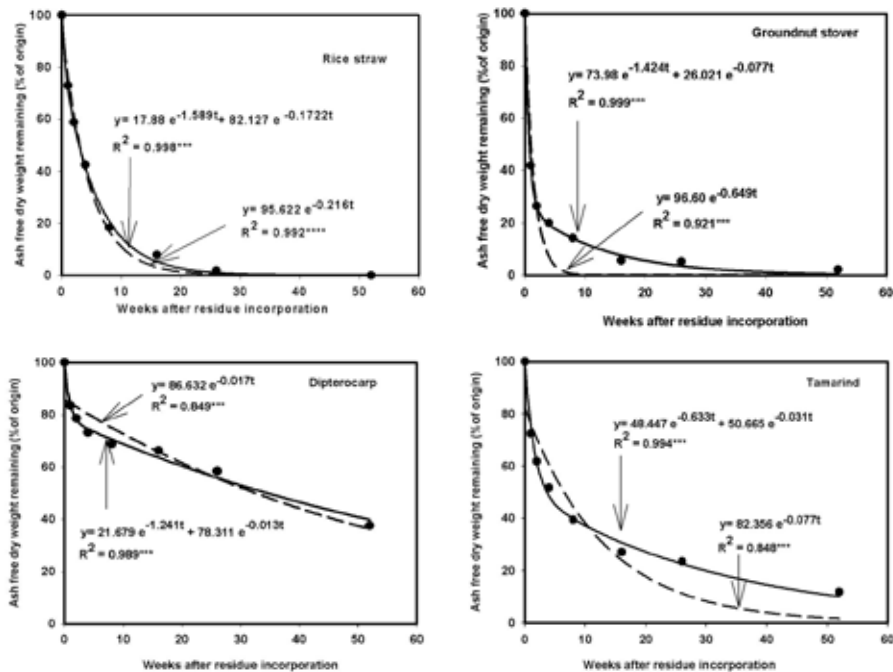


Figure 2 Ash free dry weight remaining (% of origin) of different quality residues as a function of time after soil incorporation. Dashed line represents a curve fitting to the single exponential decay model, while solid line represent a curve fitting to the double pool model (adapted from Puttaso et al., 2011).

การเปลี่ยนรูปไนโตรเจนในช่วงการสลายตัวของสารอินทรีย์

กระบวนการเปลี่ยนแปลงของ N ในช่วงของการสลายตัวโดยเฉพาะช่วงแรกของการสลายตัวมีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบทางเคมีของสารอินทรีย์ โดยพบการเกิด net N mineralization ในดินที่ใส่ซากถั่วลิสง (N สูง) และซากผสมระหว่างฟางข้าวกับซากถั่วลิสง ในขณะที่ฟางข้าว ใบมะขาม และใบพลวง ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่มีปริมาณ N ปานกลางจนถึงต่ำที่สุดเกิด net N immobilization ในช่วงแรก (1-2 สัปดาห์)

(Fig. 3) และหลังจากนั้นเกิด net N mineralization ในระดับที่ต่ำซึ่งมีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบทางเคมีของสารอินทรีย์นั้นๆ นอกจากนี้การใส่ซากผสมระหว่างฟางข้าว (N ต่ำ C/N สูง) กับซากถั่วลิสง (N สูง C/N ต่ำ) ส่งผลทำให้ชะลอการเกิด N mineralization เช่นเดียวกับที่พบในการศึกษาอื่นๆ เกี่ยวกับการปลดปล่อย N จากสารอินทรีย์ต่างชนิด (Tian et al., 1992; Vityakon et al, 2000; Kaewpradit et al., 2008)

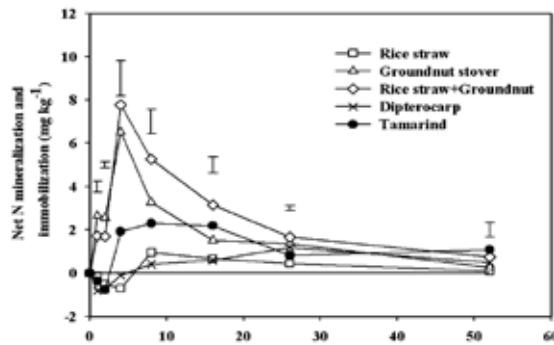


Figure 3 Net N mineralization and immobilization as affected by different quality organic materials. Vertical bars represent standard error of the difference (Puttaso et al., 2011)

การสะสมอินทรีย์วัตถุในดินที่เกิดจากการสลายตัวของสารอินทรีย์

การศึกษาการสะสม SOM ในพื้นที่เน้นที่ ปริมาณของคาร์บอน (soil organic carbon, SOC) ในดิน (ขนาด <1 มม) ปริมาณการสะสมของ C ในดินที่เพิ่มขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณ C จากสารอินทรีย์ที่ใส่โดยเห็นได้จากผลของซากผสมระหว่างฟางข้าวกับซากถั่วลิสง ซึ่งมีปริมาณของการสะสมของ C (7.6 t ha^{-1}) สูงที่สุด (Table 2) เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการใส่สารอินทรีย์เดี่ยวทั้ง 4 ชนิดจะเห็นว่าปริมาณของ C สูงที่สุดในดินที่ใส่ใบมะขาม รองลงมาคือ ซากถั่วลิสง ใบพลวงและฟางข้าว ทั้งนี้จากปริมาณของ C ในใบพลวง ที่ใส่ในดินซึ่งสูงกว่าเมื่อเทียบกับใบมะขาม แต่พบว่าปริมาณที่สะสมในดินกลับต่ำกว่าเนื่องจากว่าปริมาณของ C บางส่วนของใบพลวงยังคงอยู่ในส่วนของเศษซากอินทรีย์ (soil litter) ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า 1 มม ในขณะที่เดียวกันฟางข้าวมีปริมาณการสะสมของ C ต่ำที่สุดซึ่งสอดคล้องกับปริมาณที่ใส่ให้กับดินที่ต่ำที่สุดเช่นกัน และนอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณของเซลล์ลูลิสมีสหสัมพันธ์ทางลบกับปริมาณของ C ในดินแสดงว่าสารอินทรีย์ที่มีปริมาณเซลล์ลูลิสสูงอาจทำให้มีปริมาณ C ที่สะสมในดินต่ำ

นอกจากนี้ปริมาณการสะสมของ C ในดิน (soil organic carbon – SOC) ยังขึ้นอยู่กับปริมาณของ C ที่สูญเสียไปในรูปของ CO_2 โดยจากผลการหาสหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเพิ่มขึ้นของ SOC กับ CO_2 สะสม (cumulative CO_2) ($r = -0.869^{***}$) พบว่า ปริมาณของ CO_2 ที่ถูกปลดปล่อยสะสมมีสูงส่งผลให้มีปริมาณ SOC ที่คงเหลือและสะสมในดินต่ำ ซึ่งจะเห็นว่าในดินที่ใส่ใบมะขามมีการปริมาณ cumulative CO_2 ต่ำที่สุด (33% ของ C ที่ใส่) รองลงมาคือ ใบพลวง (41% ของ C ที่ใส่) ซึ่งเหตุผลดังกล่าวสนับสนุนผลของปริมาณ SOC ในดินที่ใส่ใบมะขามซึ่งสูงกว่าดินที่ใส่ใบพลวง ส่วนซากถั่วลิสงมีปริมาณ cumulative CO_2 สูงที่สุด (>90%) แต่ยังสามารถมีปริมาณ SOC จากการใส่ปานกลาง จึงทำให้ SOC ที่สะสมในดินอยู่ในระดับปานกลางเมื่อเทียบกับสารอินทรีย์ชนิดอื่นๆ อย่างไรก็ตามฟางข้าวมีปริมาณ cumulative CO_2 ต่ำกว่าถั่วลิสง แต่กลับมีการสะสม SOC ต่ำที่สุด คาดว่าเป็นเพราะฟางข้าวมีการสูญเสีย C ในรูปคาร์บอนรูปละลายน้ำ (dissolved organic C-DOC) สูง (เบ็ญจพร กุลนิตย์ ข้อมูลยังไม่ตีพิมพ์) กล่าวได้ว่าปริมาณ C สะสมในดินขึ้นอยู่กับปริมาณการใส่และการสูญเสียในรูปของ CO_2 และ DOC นอกจากนี้ยังมีปริมาณของซากสารอินทรีย์ที่เหลืออยู่ในดินที่ 52 สัปดาห์โดยเฉพาะในดินที่ใส่

ใบพลวงซึ่ง C ส่วนหนึ่งยังคงอยู่ใน soil litter (>1 มม) ซึ่งส่งผลให้ในดินที่ใส่ใบพลวงมีปริมาณของ C (< 1 มม) ที่เหลือในดินต่ำ แต่อย่างไรก็ตามปริมาณของ soil litter นี้จะเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการเพิ่มปริมาณ SOM ในดินทรายได้ Mapfumo et al. (2007) และ

Vityakon (2007) รายงานว่าสารอินทรีย์ที่มีคุณภาพต่ำ (มีองค์ประกอบที่เป็นสารต้านทานการสลายตัวสูง) ส่งผลต่อการเพิ่ม particulate organic matter (POM) ในดินทราย จึงเป็นแหล่งของ C ในดินแหล่งหนึ่ง (Urquiga et al., 1998)

Table 2. Soil organic C (SOC), (< 1 mm) at 52 weeks after different residue incorporation.

Residue treatment	C added (t ha ⁻¹ year ⁻¹)	SOC	
		(g kg ⁻¹)	(t ha ⁻¹)
No addition	-	1.15	2.72
Rice straw	3.67	2.31	5.54
Groundnut stover	3.88	3.00	7.10
Rice straw + Groundnut	7.55	3.99	9.28
Dipterocarp	4.53	2.96	7.06
Tamarind	4.27	3.55	8.41
SED	-	0.075****	

****= significantly different at $p < 0.0001$.

SED = standard error of the differences between means. Source: Puttaso et al. (2011)

บทบาทของสิ่งมีชีวิตผู้ทำการย่อยสลายต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างคุณภาพ

จุลินทรีย์ดินทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบดิน การจัดการดินโดยการใส่สารอินทรีย์ที่มีคุณภาพแตกต่างกัน จึงส่งผลให้โครงสร้างของประชากรจุลินทรีย์ (soil microbial community structure), มวลชีวภาพ การหายใจ รวมถึงกิจกรรมของเอนไซม์ มีการเปลี่ยนแปลง การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของชนิดและจำนวน รวมถึงกิจกรรมของจุลินทรีย์ จึงช่วยให้เข้าถึงบทบาทของคุณภาพของสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบดินที่มีอิทธิพลต่อจุลินทรีย์ดิน ตัวอย่างเช่น การศึกษามวลชีวภาพจุลินทรีย์ (microbial biomass) ที่สามารถใช้เป็นปัจจัยหนึ่งในการประเมินการหมุนเวียนธาตุอาหารและการเปลี่ยนแปลงอินทรีย์วัตถุในดิน (Vityakon, 2011) อย่างไรก็ตามการวัดมวลชีวภาพจุลินทรีย์ด้วยวิธีดังกล่าวมีข้อจำกัดคือ เป็นเทคนิคที่มี

ความละเอียดต่ำ (low resolution techniques) ที่บอกได้เพียงปริมาณ (quantity) ขนาด (size) ของโครงสร้างประชากรจุลินทรีย์เท่านั้น จึงจำเป็นต้องใช้เทคนิคที่มีความละเอียดสูงขึ้น โดยเทคนิคที่มีความละเอียดปานกลาง (medium resolution techniques) ที่สามารถจำแนกจุลินทรีย์ได้ตามองค์ประกอบทางชีวเคมีที่พบเป็นองค์ประกอบในเยื่อหุ้มเซลล์จุลินทรีย์ จึงจัดเป็นตัวชี้วัดทางชีวเคมี (biochemical marker) เช่น การวิเคราะห์ Phospholipid fatty acid (PLFA) หรือ Fatty acid methyl esters (FAMES) เป็นต้น (Powlson et al., 2001) ส่วนเทคนิคที่มีระดับความละเอียดสูง (high resolution techniques) ทางชีวโมเลกุลที่สามารถบ่งชี้ถึงลักษณะเฉพาะเปรียบได้กับลายนิ้วมือ (fingerprint) ของจุลินทรีย์ชนิดนั้นๆ ได้ จึงสามารถจำแนกชนิดของจุลินทรีย์ได้ถึงระดับสายพันธุ์ (species) เทคนิคดังกล่าวได้แก่ Terminal restriction fragment length

polymorphism (T-RFLP) และ Denaturing gradient gel electrophoresis (DGGE) เป็นต้น (Bardgett et al., 2005) Kamolmanit et al. (2013) ใช้เทคนิค T-RFLP และวิเคราะห์ความคล้ายคลึง (Analysis of similarities: R) ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างประชากรราในดินทรายที่มีการใส่สารอินทรีย์คุณภาพแตกต่างกันอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 16 ปี พบว่าประชากรราในดินที่มีการใส่สารอินทรีย์ที่มีลิกนินและโพลีฟีนอลเป็นองค์ประกอบอยู่สูง ได้แก่ ใบพลวงร่วง (native dipterocarp treated soil: NDP) ส่งผลให้โครงสร้างประชากรรามีความแตกต่างจากกรรมวิธีควบคุม (control: C) มากที่สุด ($R = 0.926$) ตามด้วยกรรมวิธีที่มีการใส่สารอินทรีย์ที่มีปริมาณลิกนินและโพลีฟีนอลต่ำกว่า ได้แก่ ใบมะขามร่วง (native tamarind treated soil: NTM) ($R = 0.815$), ชากถั่วลิสง (native groundnut treated soil: NGN) ($R = 0.444$) และฟางข้าว (native rice straw treated soil: NRS) ($R = 0.407$) ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเทคนิคทางชีวโมเลกุลดังกล่าวยังไม่สามารถชี้ให้เห็นถึงหน้าที่ (function) ของจุลินทรีย์ในดินได้ ดังนั้นเพื่อให้สามารถทราบถึงหน้าที่ของจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นระหว่างการย่อยสลายสารอินทรีย์ จึงจำเป็นต้องทำการตรวจวัดกิจกรรมเอนไซม์ของจุลินทรีย์ร่วมด้วย

กิจกรรมของเอนไซม์ที่จุลินทรีย์ผลิตขึ้นเพื่อย่อยสลายอินทรีย์ส่งผลให้เกิดการสะสมอินทรีย์วัตถุในดิน กิจกรรมของเอนไซม์หลายชนิดจึงได้รับความสนใจในการศึกษาระหว่างการย่อยสลายสารอินทรีย์คุณภาพแตกต่างกัน การศึกษาเอนไซม์ที่มีความจำเพาะสูงหรือระดับปานกลาง (medium specificity assay) ได้แก่ เอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับวงจรธาตุอาหารต่างๆ ตัวอย่าง

เช่น เอนไซม์ cellulase, B-glucosidase, xylanase, และ invertase เป็นต้น เป็นเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ง่ายต่อการย่อยสลายที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ นอกจากนี้เอนไซม์ที่พบในดินเช่น phenol oxidase และ peroxidase เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ส่วนที่ต้านทานต่อการย่อยสลาย เช่น ลิกนินและโพลีฟีนอล (Sinsabaugh et al., 1992; Caldwell, 2005) การใส่สารอินทรีย์คุณภาพแตกต่างกันลงในดินเป็นระยะเวลายาวนานสามารถส่งผลต่อกิจกรรมของเอนไซม์บางชนิดในดินและส่งผลกระทบต่ออัตราการสะสมอินทรีย์วัตถุในดินได้ โดย Puttaso et al. (2011) แสดงให้เห็นว่าการใส่สารอินทรีย์ที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบอยู่สูง เช่น ชากถั่วลิสง และใบมะขามร่วง ส่งผลให้ดินมีการสะสมไนโตรเจนสูง โดยไนโตรเจนในดิน (soil organic nitrogen: SON) ส่งผลกระตุ้นกิจกรรมของเอนไซม์ที่ทำหน้าที่ย่อยสลายเซลลูโลส ได้แก่ B-glucosidase (Fig. 5a) ให้สูงขึ้นในกรรมวิธีที่มีการใส่ชากถั่วลิสงและใบมะขามร่วง เมื่อเปรียบเทียบกับกรรมวิธีที่มีการใส่ฟางข้าวและใบพลวงร่วง ซึ่งมีการสะสมของไนโตรเจนในดินต่ำกว่า ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวตรงข้ามกับกิจกรรมของ phenoloxidase ที่ทำหน้าที่ย่อยสลายลิกนินและโพลีฟีนอล (Fig. 5b) (Kamolmanit et al., 2013) จากงานศึกษาข้างต้นแสดงให้เห็นถึงความจำเพาะของเอนไซม์ต่อ substrate ดังนั้นการใส่สารอินทรีย์คุณภาพแตกต่างกันลงในดินเพื่อปรับปรุงคุณภาพดิน นอกจากส่งผลกระตุ้นกิจกรรมของเอนไซม์ในดินได้แตกต่างกันแล้ว ยังเชื่อมโยงไปถึงการย่อยสลายสารอินทรีย์และสะสมอินทรีย์วัตถุในดินได้แตกต่างกัน

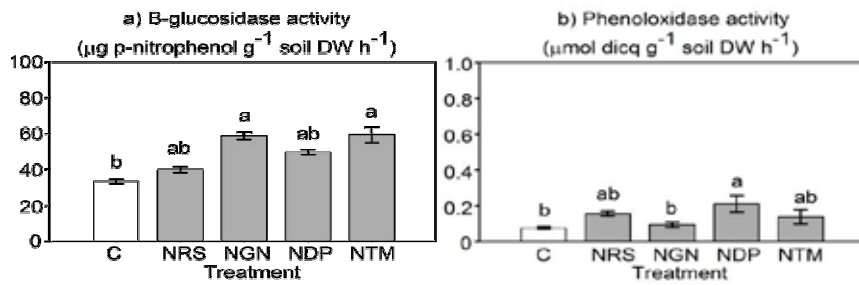


Figure 5 B-glucosidase (a) and phenoloxidase (b) activities in incubated soil samples after 16 years of residue addition. Treatments are: control soil without any input (C), rice straw (NRS), groundnut stover (NGN), as well as leave litter from dipterocarp (NDP), and tamarind (NTM) at day 0 incubation. Different letters indicate significant differences at $P < 0.05$. Bars represent standard error of means of three measurements.

สรุป

การศึกษาเชิงกระบวนการของกลุ่มวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นว่า กระบวนการย่อยสลายของสารอินทรีย์ที่มีองค์ประกอบทางเคมี (คุณภาพ) ต่างกัน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการสะสมอินทรีย์วัตถุและการปลดปล่อยธาตุอาหาร N ในดินเนื้อทรายได้ต่างกัน สารอินทรีย์คุณภาพปานกลาง (มี N, ลิกนินและโพลีฟีนอลปานกลาง) เช่น ใบร่วงมะขาม ทำให้เกิดการสะสมอินทรีย์ C ได้มากที่สุด ในขณะที่สารอินทรีย์คุณภาพต่ำที่มีเซลลูโลสสูง แต่มี N, ลิกนินและโพลีฟีนอลต่ำ ได้แก่ ฟางข้าว ทำให้มีการสะสมต่ำที่สุด สาเหตุเนื่องมาจากฟางข้าวสูญเสีย C ไปจากการหายใจของสิ่งมีชีวิตผู้ย่อยสลายโดยเฉพาะอย่างยิ่งจุลินทรีย์ ในรูปก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และในรูปสารประกอบคาร์บอนที่ละลายน้ำได้ (DOC) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ที่ถูกชะล้างออกจากดินชั้นบนได้ง่าย ส่วนใบพลวงที่เป็นสารอินทรีย์คุณภาพต่ำที่มี N ต่ำ แต่มีลิกนินและโพลีฟีนอลสูง จะมีปริมาณอินทรีย์วัตถุส่วนที่เป็นขึ้น (POM) ค่อนข้างมาก เนื่องจากมีความต้านทานในการย่อยสลาย การปลดปล่อยธาตุอาหาร N เกิดอย่างรวดเร็ว และเป็นปริมาณมาก (สูงสุดใน 4 สัปดาห์) ในสารอินทรีย์คุณภาพสูง เช่น ชากถั่วลิสง แต่ปริมาณการปลดปล่อย N ลดลงอย่างรวดเร็ว การผสมสาร

อินทรีย์คุณภาพสูงกับต่ำเข้าด้วยกัน เช่น ชากถั่วลิสงผสมฟางข้าว ช่วยชะลอให้การปลดปล่อย N ไม่ลดต่ำอย่างรวดเร็วได้ นับเป็นแนวทางหนึ่งที่จะควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารให้ตรงกับระยะความต้องการของพืช การศึกษาของกลุ่มวิจัยที่เจาะลึกลงไปในกลุ่มชีวภาพในการย่อยสลายหรือศึกษาปัจจัยสิ่งมีชีวิตที่ทำการย่อยสลายได้แก่ จุลินทรีย์เน้นที่เชื้อราได้ชี้ให้เห็นถึงกลไกการย่อยสลายที่ต่างกัน โดยเห็นได้จากการมีประชากรจุลินทรีย์ที่แตกต่างกันตามชนิดของสารอินทรีย์ต่างคุณภาพที่ใส่ให้ดิน โดยสารอินทรีย์คุณภาพต่ำที่มีลิกนินและโพลีฟีนอลสูง เช่น ใบพลวงร่วง เหนียวนำไปเกิดประชากรเชื้อราที่ต่างจากกรรมวิธีสารอินทรีย์อื่นๆ แสดงให้เห็นถึงองค์ประกอบที่ย่อยสลายยาก ที่ต้องอาศัยชนิดของราที่มีความจำเพาะในการย่อยสลาย นอกจากนี้หน้าที่ของจุลินทรีย์ในการย่อยสลาย โดยดูจากกิจกรรมของเอนไซม์ที่ย่อยสลายสารประกอบ C ยังมีความแตกต่างกันในสารอินทรีย์คุณภาพต่างๆ ได้แก่ เบตาไกลูโคซิเดสที่ย่อยสลายสารประกอบคาร์บอนที่ย่อยสลายง่าย มีกิจกรรมสูงในสารอินทรีย์คุณภาพปานกลางถึงสูง ได้แก่ ชากถั่วลิสงและใบมะขามร่วง ส่วนกิจกรรมเอนไซม์ฟีนอลออกซิเดสซึ่งย่อยสลายสารประกอบ C ที่ย่อยสลายยากมีสูงในกรรมวิธีใบพลวง

กิตติกรรมประกาศ

การสนับสนุนเงินทุนการวิจัยของกลุ่มวิจัยอินทรีย์วัตถุของดินที่ได้นำผลมาปริทัศน์ได้จากแหล่งต่างๆ ได้แก่ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ผ่านโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก (คปก.) รุ่นที่ 8-11 และโครงการวิจัยมุ่งเป้า (targeted basic research) ของฝ่ายวิชาการสกว. (2551-2553 และ 2554-2557), ทุนอุดหนุนทั่วไปมหาวิทยาลัยขอนแก่น (มข.) ประจำปีงบประมาณ 2550-2554, ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีชีวภาพทางการเกษตรเพื่อเศรษฐกิจที่ยั่งยืน มข. ศูนย์เทคโนโลยีชีวภาพทางการเกษตร (AG-BIO/PERDO-CHE), โครงการแลกเปลี่ยนนักวิจัยของรัฐบาลเยอรมนี ภายใต้แผนงานการแลกเปลี่ยนบุคลากรในโครงการวิจัยร่วม ประจำปี 2553 (Project-based Personnel Exchange Program-PPP 2010), ทุนสมทบ มข. ให้แก่ผู้ได้รับทุนคปก. ประจำปี 2553, และโครงการการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินและความเสื่อมโทรมของดินที่สัมพันธ์กันในพื้นที่ลูกคลื่นของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ภายใต้ทุนวิจัยความร่วมมือกับต่างประเทศ (2541-2547)

เอกสารอ้างอิง

- Bardgett, R. D., M. B. Usher, and D. W. Hopkins. 2005. Biological diversity and function in soils. Cambridge University Press, NY, USA.
- Caldwell, B. A. 2005. Enzyme activities as a component of soil biodiversity: A review. In: International symposium on Impacts of Soil Biodiversity on Biogeochemical Process in Ecosystems, Taipei, Taiwan. *Pedobiologia*. 49: 637-644.
- Hada, A., L. Kautsky, M. Goek, and E. E. Kara. 2004. Rates of decomposition of plant residues and available nitrogen in soil, related to residue composition through simulation of carbon and nitrogen turnover. *Soil Biol Biochem*. 36:255-266.
- Kaewpradit, W., B. Toomsan, P. Vityakon, V. Limpinuntana, P. Saenjan, S. Jogloy, A. Pathanothai, and G. Cadisch. 2008. Regulating mineral N release and greenhouse gas emissions by mixing groundnut residues and rice straw under field conditions. *Eur J Soil Sci*. 59: 640-652.
- 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 Soil*. DOI: 10.1007/s00374-013-0785-7.
- Mapfumo, P., F. Mtambanengwe, and B. Vanlanuwe. 2007. Organic matter quality and management effects on enrichment of soil organic matter fraction in contrasting soils in Zimbabwe. *Plant Soil*. 296:137-150.
- Muller, M. M., V. Sudman, O. Soininvaara, and A. Merilainen. 1988. Effect of chemical composition on the release of nitrogen from agricultural plant materials decomposing in soil under field condition. *Biol Fertil Soils*. 6:621-626.
- Palm, C. A., C. N. Gachengo, R.J. Delle, G. Cadisch, and K.E. Giller. 2001. Organic inputs for soil fertility management in tropical agroecosystems: application of an organic resource database. *Agric Ecosyst Environ*. 83:27-42.
- Powlson, D. S., P. R. Hirsch, and P. C. Brookes. 2001. The role of soil microorganisms in soil organic matter conservation in the tropics. *Nutr Cycl Agroecosyst*. 61:41-51.
- Puttaso, A., P. Vityakon, P. Saenjan, V. Trelo-ges, and G. Cadisch. 2011. Relationship between residue quality, decomposition patterns, and soil organic matter accumulation in a tropical sandy soil after 13 years. *Nutr Cycl Agroecosyst*. 89:159-174.
- Samahadthai, P., P. Vityakon, P. Saenjan. 2010. Effects of different quality plant residues on soil carbon accumulation and aggregation formation in a tropical sandy soil in Northeast Thailand as revealed by a 10-year field experiment. *Land Degrad Dev*. 21:463-473.
- Sinsabaugh, R. L., R. K. Antibus, A. E. Linkins, C. A. Mclaugherty, L. Rayburn, D. Repert, and T. Weiland. 1992. Wood decomposition over a first-order watershed: mass loss as a function of lignocellulase activity. *Soil Biol Biochem*. 24:743-749.

- Thomas, R. J., and N. M. Asakawa. 1993. Decomposition of leaf litter from tropical forage grasses and legumes. *Soil Biol Biochem.* 25:1351-1361.
- Tian, G., B. T. Kang, and L. Brussaard. 1992. Biological effects of plant residues with contrasting chemical compositions under humid tropical conditions-decomposition and nutrient release. *Soil Biol Biochem.* 24:1051-1060.
- Urquiga, S., G. Cadisch, B. J. R. Alves, R. M. Boddey, and K. E. Giller. 1998. Influence of decomposition of roots of tropical forage species on the availability of soil nitrogen. *Soil Biol Biochem.* 30:2099-2106.
- Vityakon, P. 2007. Degradation and restoration of sandy soils under different agricultural land uses in Northeast Thailand: A Review. *Land Degrad Develop.* 18:567-577.
- Vityakon, P. 2011. Soil organic matter and soil quality in Northeast Thailand. Department of Plant Science and Agricultural Resources, Faculty of Agriculture, Khon Kaen University, Khon Kaen.
- Vityakon, P., S. Meepetch, G. Cadisch, and B. Toomsan. 2000. Soil organic matter and nitrogen transformation mediated by plant residues of different quality in sandy acid upland and paddy soil. *Neth J Agric Sci.* 48:75-90.