บทที่ 5
สรุปผลการทดลอง

5.1 การศึกษาระยะยาวของอิทธิพลของการใส่สารอินทรีย์ต่างคุณภาพต่อการเปลี่ยนแปลงและการสะสมอินทรียวัตถุในดินทราย

5.1.1 การศึกษาการเปลี่ยนรูปของอินทรียวัตถุที่ละลายน้ำ (DOM) ที่ได้รับอิทธิพลจากคุณภาพสารอินทรีย์

จากการศึกษาการสะสมอินทรียวัตถุ (soil organic matter; SOM) จากการใส่สารอินทรีย์ต่างคุณภาพลงในดินทรายเป็นระยะเวลา 13 ปี ดินของกรรมวิธีที่ได้รับซากถั่วลิสง (GN) และใบ+ก้านมะขามร่วง (TM) มีความเข้มข้นของคาร์บอนที่ละลายน้ำทั้งหมด (total DOC) สูงกว่ากรรมวิธีที่ได้รับใบพลวง (DP) และฟางข้าว (RS) รูปแบบของการกระจายตัวของ DOC ในหน้าตัดดินถูกกำหนดโดยคุณภาพของสารอินทรีย์นั้นๆ มี 2 รูปแบบ คือ 1) DOC ที่เคลื่อนที่ในแนวดิ่งในหน้าตัดดินได้เป็นปริมาณมากเป็นผลให้ DOC ถูกสะสมไว้ที่ดินชั้นล่างมากกว่าในดินชั้นบน 2) DOC ที่เคลื่อนที่ในแนวดิ่งได้เป็นปริมาณน้อยจึงถูกสะสมไว้ที่ดินชั้นบนมากกว่าในดินชั้นล่าง กรรมวิธีที่ใส่ฟางข้าว (RS) ซึ่งมีองค์ ประกอบของเซลลูโลสสูงทำให้เกิด DOC ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (low molecular weight; LMW-DOC) ถูกดูดยึดโดยคอลลอยด์ดินได้น้อย ทำให้เคลื่อนที่และถูกชะล้างได้มาก และยังผลให้สะสมอยู่ที่ดินชั้นล่างมากกว่าวิธีที่ใส่สารอินทรีย์อื่นๆ ในขณะที่กรรมวิธีที่ใส่ซากถั่วลิสง ใบ+ก้านมะขามร่วง และใบพลวงร่วงมี DOC ที่เคลื่อนที่ลงสู่ดินชั้นล่างในแนวดิ่งน้อย เนื่องจากซากถั่วลิสงมีองค์ประกอบของไนโตรเจนสูง แต่มีลิกนิน โพลีฟีนอลส์ และอัตราส่วนของ C/N ต่ำ ทำให้ DOC เคลื่อนที่ในแนวดิ่งได้น้อยจึงเกิดการสะสม DOC สูงในดินชั้นบน และไม่มีการสะสม DOC ในดินชั้นล่างตลอดระยะเวลาของการย่อยสลายสารอินทรีย์ ในขณะที่ใบพลวงร่วงมีองค์ประกอบของไนโตรเจนต่ำ แต่มีลิกนิน โพลีฟีนอลส์ และอัตราส่วน C/N สูง ใบ+ก้านมะขามร่วงมีองค์ประกอบของไนโตรเจน ลิกนิน และโพลีฟีนอลส์ปานกลาง จึงทำให้มีการสร้าง DOC ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (high molecular weight; HMW-DOC) ทำให้ถูกดูดยึดโดยคอลลอยด์ดินมาก ส่งผลให้เคลื่อนที่ในแนวดิ่งน้อย จึงถูกสะสมไว้ที่ดินชั้นบน จึงสรุปได้ว่าคุณภาพหรือองค์ประกอบทางเคมีของสารอินทรีย์มีอิทธิพลอย่างสำคัญต่อคุณสมบัติของ DOC ซึ่งส่งผลต่อการเคลื่อนที่และการสะสม SOM ในหน้าตัดดินได้ต่างกัน

5.1.2 การสร้างแบบจำลองเพื่อศึกษาการสลายตัวและการสะสมอินทรียวัตถุ (modeling of decomposition and SOM accumulation) หลังการใส่สารอินทรีย์อย่างต่อเนื่องระยะยาวในดินทราย

1. แบบจำลองการสลายตัวของสารอินทรีย์ คือ ฟางข้าว ใบพลวงร่วง และใบ+ก้านมะขามร่วง ได้เลือกใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สมการเอ็กซ์โพเนนเชียลแบบ 2 เทอม สอดคล้องกับองค์ประกอบทางเคมีของสารอินทรีย์ 2 ส่วนได้แก่ ส่วนที่ย่อยสลายง่าย และส่วนที่ย่อยสลายยาก เนื่องจากสมการคณิตศาสตร์แบบนี้ให้ค่า R^2 (coefficient of determination) จากการฟิตกราฟได้สูงที่สุด นอกจากนี้สัดส่วนของน้ำหนักที่หายไป มีความใกล้เคียงกับผลจริง (หรือค่าสังเกตการณ์) ที่ได้จากการตรวจเอกสารมากที่สุด โดยสารอินทรีย์ที่สลายตัวเร็วที่สุดได้แก่ ฟางข้าวรองลงมาเป็นใบ+ก้านมะขามร่วง และสลายตัวช้าที่สุดคือใบพลวงร่วง ส่วนสารอินทรีย์ซากถั่วลิสง ได้เลือกใช้แบบจำลอง

ทางคณิตศาสตร์สมการเอ็กซ์โพเนนเชียลแบบ 3 เทอม ได้แก่ ส่วนที่ย่อยสลายง่าย ส่วนที่ย่อยสลายปานกลาง และส่วนที่ย่อยสลายยาก ซึ่งให้ค่า R^2 สูงที่สุด

2. แบบจำลองการสะสมอินทรียวัตถุในดินทรายจากการใส่สารอินทรีย์ต่างคุณภาพ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สมการเอ็กซ์โพเนนเชียล พบว่ากรรมวิธีใบพลวงร่วงทำให้เกิดการสะสมตัวเป็นอินทรียวัตถุได้นานที่สุดเนื่องจากมีการสลายตัวช้าที่สุด ซึ่งผลจากแบบจำลองชี้ให้เห็นว่าอินทรียวัตถุในดินที่ได้จากการใส่ใบพลวงร่วงจะเหลือเป็นศูนย์ เมื่อเวลาผ่านไป 7 ปี ส่วนอินทรียวัตถุที่ได้จากการใส่ใบ+ก้านมะขามร่วงจะหมดไปเมื่อเวลาผ่านไป 3 ปี แต่ซากถั่วลิสงและฟางข้าวจะหมดไปในปีแรกเพราะสลายตัวเร็ว

จะเห็นว่าข้อดีของแบบจำลองคือทำให้สามารถคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงที่จะเกิดขึ้นในอนาคตได้ และข้อดีของการทดลองศึกษาการสลายตัวของสารอินทรีย์และการสะสมอินทรียวัตถุในดินในระยะยาวคือ 1) สามารถนำข้อมูลมาใช้ในการสร้างและทวนสอบแบบจำลองการสลายตัวสารอินทรีย์ ที่ทำให้เกิดความเข้าใจองค์ประกอบทางเคมีหลักของสารอินทรีย์ที่มีอิทธิพลต่อการสลายตัว และ 2) สามารถนำข้อมูลมาใช้ในการสร้างและทวนสอบแบบจำลองการสะสมอินทรียวัตถุในดินจากการใส่สารอินทรีย์ต่างคุณภาพ ที่ใช้ในการคาดการณ์การสะสมอินทรียวัตถุในอนาคต การทวนสอบแบบจำลองที่สร้างขึ้นทำให้วิเคราะห์ได้ว่าค่าที่ได้จากการคาดการณ์โดยแบบจำลองมีความใกล้เคียงกับค่าข้อมูลจริงมากน้อยเพียงใด ซึ่งจะทำให้ทราบประสิทธิภาพของแบบจำลองที่สร้างขึ้นว่าเหมาะสมที่จะนำมาใช้หรือไม่ ดังเช่นแบบจำลองการสะสมอินทรียวัตถุในการทดลองนี้ เมื่อนำมาทวนสอบด้วยข้อมูลจริงพบว่าแบบจำลองนี้ยังไม่มีประสิทธิภาพที่ดีพอ เนื่องจากค่าที่ได้จากคาดการณ์มีค่าการสะสมเท่ากับศูนย์หลังจากเวลาผ่านไป ซึ่งในธรรมชาติแล้วสารอินทรีย์จะยังคงหลงเหลืออยู่ไม่ย่อยสลายหมด

5.1.3 การศึกษาชนิดประชากรและกิจกรรมจุลินทรีย์ดินที่ทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างคุณภาพในดินของการทดลองระยะยาว

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าคุณภาพหรือองค์ประกอบทางเคมีของสารอินทรีย์ที่ใส่ให้ดิน เป็นปัจจัยหลักปัจจัยหนึ่งที่ควบคุมโครงสร้างประชากรจุลินทรีย์ โดยเฉพาะในที่นี้ประชากรรา และการทำหน้าที่ในการย่อยสลายของจุลินทรีย์เหล่านี้ ปริมาณประชากรราโดยใช้ปริมาณยีน (gene abundance) เป็นตัวชี้มีมากที่สุดในกรรมวิธีที่ใส่ใบ+ก้านมะขามร่วงอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 16 ปี รองลงมาคือ ซากถั่วลิสง และมีต่ำในกรรมวิธีที่ใส่ใบพลวงร่วงและฟางข้าว ซึ่งสอดคล้องกับการสะสมอินทรียวัตถุในดินที่มีมากที่สุดในกรรมวิธีใบ+ก้านมะขามร่วง รองลงมาคือซากถั่วลิสง และมีการสะสมต่ำที่สุดในฟางข้าว ในกรรมวิธีที่ได้รับใบพลวงร่วงอย่างต่อเนื่อง 16 ปี มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างประชากรราสูงที่สุด ส่วนกรรมวิธีฟางข้าวพบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างประชากรราต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรรมวิธีที่ไม่ใส่สารอินทรีย์ สอดคล้องกับคุณภาพของสารอินทรีย์ ใบพลวงร่วงมีสารต้านทานการย่อยสลายเป็นองค์ประกอบมาก เหนี่ยวนำให้เกิดประชากรราที่จะเข้าย่อยสลายสารที่ย่อยยากเหล่านี้ ในขณะที่ฟางข้าวมีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบมาก แต่มีสารต้านทานการย่อยสลายต่ำ จึงพบเพียงชนิดราประเภทประจำถิ่นที่ไม่มีความจำเพาะสูง การศึกษาหน้าที่ (function) ของจุลินทรีย์ดินโดยใช้เอนไซม์ที่หมุนเวียนคาร์บอน 4 ชนิดเป็นตัวชี้ ให้ผลสอดคล้องไปกับผลของประชากรรา กล่าวคือ พบความจำเพาะของเอนไซม์ (functional specialization) ที่ทำหน้าที่ในการย่อยสลายสารที่ย่อยสลายยาก เช่น เอนไซม์ phenoloxidase ที่มีกิจกรรมสูงในกรรมวิธีใบพลวงร่วงทั้งในการสลายตัวในระยะ

ยาว (การทดลองที่ 1) และระยะสั้น (การทดลองที่ 2) และพบความไม่จำเพาะในการทำหน้าที่ (functional redundancy) ในเอนไซม์ invertase และ β-glucosidase ที่พบว่ามีกิจกรรมสูงในกรรมวิธีซากถั่วลิสงและฟางข้าวทั้งในระยะสั้นและระยะยาว แสดงให้เห็นว่าเอนไซม์ทั้งสองถูกสังเคราะห์โดยจุลินทรีย์ประจำถิ่น (*M. thermophila*) โดยการกระตุ้นของ substrate ที่ย่อยสลายง่าย ได้แก่ น้ำตาลและเซลลูโลส รวมทั้งไนโตรเจนที่สะสมอยู่ในดินและเป็นองค์ประกอบของซากถั่วลิสง นอกจากนี้ยังพบว่าจุลินทรีย์มีการเปลี่ยนแปลงเมตาบอลิซึมในระหว่างที่ทำการย่อยสลายจากการผลิตเอนไซม์ชนิดปกติเป็นเอนไซม์ตัวใหม่ขึ้นกับ substrate ที่เกิดขึ้นอยู่ในช่วงนั้นๆ ได้ด้วย

5.2 การศึกษาอิทธิพลของการใช้ที่ดินในระบบการทำฟาร์มในพื้นที่ลูกคลื่นลอนลาดต่อการเก็บกักและการเคลื่อนย้ายคาร์บอน ซึ่งเป็นการศึกษาวิธีการแยกถ่านและทดสอบวิธีการวิเคราะห์คาร์บอนในถ่านที่ระดับความลึกต่างๆ ของดินในแต่ละการใช้ที่ดิน

วิธีการวิเคราะห์คาร์บอนในถ่านในดินที่มีความเหมาะสมในการนำมาใช้ในงานวิจัยปริมาณคาร์บอนในถ่านในดินภายใต้การใช้ที่ดินต่างๆ **คือ วิธีผสมผสาน** วิธีการสันดาปเปียกและแห้งเข้าด้วยกัน หลักการคือกำจัดคาร์บอนที่ไม่ใช่ส่วนของถ่านออกไปด้วยวิธีสันดาปเปียก คาร์บอนส่วนนี้ไม่คงทนต่อการย่อยสลายเท่าถ่าน จึงสามารถถูกกำจัดโดยการอ็อกซิไดซ์ด้วยสารเคมี (สันดาปเปียก) ได้สารเคมีที่ใช้แตกต่างกันออกไป เช่น กรดไตรฟลูออโรอะซิติกที่ปราศจากออกซิเจน (O_2-free trifluoroacetic acid, TFA: $C_2HF_3O_2$) หรือใช้ส่วนผสมระหว่างเปอร์ออกไซด์และกรดไนตริกแบบไม่เข้มข้น (peroxide/weak nitric acid) เป็นต้น วิธีการที่ตรวจเอกสารเป็นวิธีการของ Kurth et al. (2006) เป็นวิธีการที่เรียกว่า peroxide/weak nitric acid method ซึ่งได้ใช้ 30% H_2O_2 ร่วมกับ 1*M* HNO_3 เพื่อกำจัดคาร์บอนที่ไม่ใช่ถ่านออกไป และถือว่าคาร์บอนที่เหลืออยู่คือคาร์บอนที่อยู่ในรูปของถ่าน นำคาร์บอนที่เหลืออยู่นี้ไปวิเคราะห์ด้วยวิธีสันดาปแห้ง ซึ่งเป็นวิธีการเผาที่ใช้ความร้อนสูง ซึ่งวิธีนี้มีข้อดีคือเป็นการวิเคราะห์คาร์บอนที่อยู่ในรูปของถ่านที่ค่อนข้างถูกต้อง เนื่องจากเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านมาตรฐานที่ทราบปริมาณคาร์บอนชัดเจนแล้ว วิธีการนี้ถือว่าเชื่อถือได้ อีกการหนึ่งคือเป็นวิธีที่ไม่ซับซ้อน