บทที่ 2
การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 อินทรียวัตถุส่วนที่ละลายน้ำ (DOM) ในดินที่มีการใส่สารอินทรีย์ต่างคุณภาพติดต่อกันเป็นระยะเวลานาน

2.1.1 ลักษณะของอินทรียวัตถุส่วนที่ละลายได้ (dissolve organic matter; DOM) ในดิน

อินทรียวัตถุส่วนที่ละลายน้ำได้ (DOM) ในดิน คือ วัสดุอินทรีย์ที่มีขนาดเล็กกว่า 0.45 µm (Kalbitz et al., 2000) DOM สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ขึ้นอยู่กับ 1) ความแตกต่างของน้ำหนักโมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์ที่ละลายอยู่ในสารละลายดิน 2) การกระจายตัวในช่องว่างที่แตกต่างกันในเม็ดดิน (aggregates)

การแบ่งประเภทของ DOM ที่ขึ้นอยู่กับความแตกต่างของน้ำหนักโมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์ที่ละลายอยู่ในสารละลายดินนั้น สามารถแบ่งได้ดังนี้

- DOM ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (low molecular weight DOM; LMW-DOM)
- DOM ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (high molecular weight DOM; HMW-DOM)

LMW-DOM และ HMW-DOM นี้ยังแบ่งออกเป็น คาร์บอนส่วนที่ละลายได้ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (LMW-DOC), คาร์บอนส่วนที่ละลายได้ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง(HMW-DOC), ไนโตรเจนส่วนที่ละลายได้ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (LMW-DON) และไนโตรเจนส่วนที่ละลายได้ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (HMW-DON) ในขณะที่ LMW-DOC คือ คาร์บอนส่วนที่ละลายได้ (dissolve organic carbon; DOC) ที่ละลายอยู่ในสารละลายดิน ประกอบด้วย น้ำตาลกลูโคส (glucose), กรดกลูคูโรนิก (glucuronic acid), กรดกาแล็กทูโรนิก (galacturonic acid), น้ำตาลแรมโนส (rhamnose), น้ำตาลแอราบิโนส (arabinose) และน้ำตาลกาแล็กโทส (galactose) ในขณะที่ HMW-DOC ประกอบด้วย คาร์โบไฮเดรต (carbohydrate) ได้แก่ เซลลูโลส (cellulose), ลิกนิน (lignin) และโพลิฟีนอลส์ (polyphenol) เป็นต้น (Jones et al., 2004) ในทำนองเดียวกัน LMW-DON คือ ไนโตรเจนส่วนที่ละลายได้ (dissolve organic carbon; DON) ที่ละลายอยู่ในสารละลายดิน จำพวกกรดอะมิโน (amino acid) ได้แก่ อลานีน (alanine), ไกลซีน (glycine), กรดกลูตามิก (glutamic acid), เซอรีน (serine) และ ลิวซีน (leucine) เป็นต้น, น้ำตาลอะมิโน (amino sugars) ได้แก่ กาแล็กโทซามีน (galactosamine), กลูโคซามีน (glucosamine) เป็นต้น, ยูเรีย (urea), พิวรีน (puries), โปรตีน (proteins), คลอโรฟิลล์ (chlorophyll) และ กรดดีออกซีไรนิวคลีอิก (deoxyribonucleic acid; DNA)

การแบ่งประเภทของ DOM ที่ขึ้นอยู่กับการกระจายตัวในช่องว่างที่แตกต่างกันในเม็ดดิน ประกอบด้วย DOM I, DOM II และ DOM III (Zsolnay, 2003) DOM I (DOM ที่กระจายตัวอยู่ในช่องว่างที่มีขนาดน้อยกว่า 0.2 µm) คือ DOM ในเม็ดดินขนาดเล็ก (microaggregate) ซึ่งได้รับการป้องกันทางกายภาพจากจุลินทรีย์ และไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ DOM II (DOM ที่กระจายตัวอยู่ในช่องว่างที่มีขนาด 0.2-6µm) จะถูกพบอยู่ในเม็ดดินขนาดกลาง (mesoaggregate) ซึ่งเป็นแหล่งของ DOM ที่เป็นประโยชน์แต่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ ในขณะที่ DOM III (DOM ที่กระจายตัวอยู่ในช่องว่างที่มีขนาดใหญ่กว่า 6 µm) สามารถเคลื่อนที่ได้ (mobile organic matter; MOM) พบได้ในเม็ดดินขนาดใหญ่ (macroaggregate) (Silveira, 2005; Zsolnay, 2003)

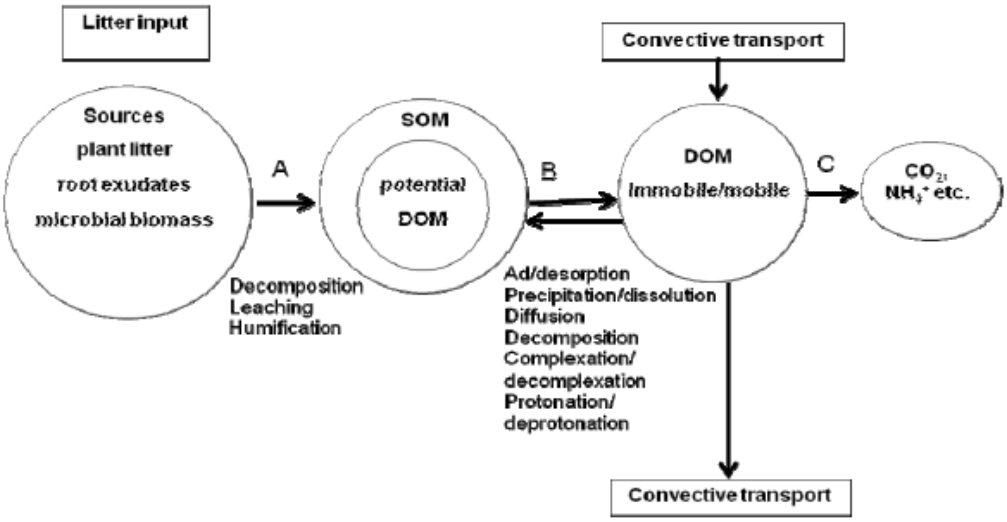
2.1.2 แหล่งของอินทรียวัตถุส่วนที่ละลายได้ (DOM) ในดิน

แหล่งสำคัญของ DOM ในดินประกอบด้วย ซากพืช, ฮิวมัส (humus) ที่อยู่ในดิน, มวลชีวภาพจุลินทรีย์ (microbial biomass) และสารที่รากพืชขับออกมา (root exudates) (Kalbitz et al., 2000) จากการศึกษาของ Gundersen et al. (1998) พบว่า การไหลเวียน (flux) และความเข้มข้นของ DOC (dissolve organic carbon) มีความสัมพันธ์กับปริมาณของซากที่เพิ่มเข้าไป ในขณะที่ Michalzik and Matzner (1999) รายงานว่าชั้น Oi (Oi layer) มี DOC และ DON เป็นปริมาณมากที่สุด

ฮิวมัส (humus) ที่อยู่ในดินมีความสัมพันธ์สูงกับความเข้มข้นของ DOM สอดคล้องกับ Zsolnay (1996) พบว่าอินทรียวัตถุในรูปของสารฮิวมิก (humified organic matter) เป็นแหล่งหลักของ DOC ในขณะที่ Smolander and Kitunen (2002) รายงานว่า ดินที่พัฒนามาจากชั้นฮิวมัส (humus layer) ที่มีอินทรียวัตถุสูงส่งผลให้มีความเข้มข้นของ DOM สูง

อีกแหล่งหนึ่งของ DOM ที่มีผลกระทบต่อพลวัต (dynamic) ของ DOM คือ มวลชีวภาพจุลินทรีย์ (microbial biomass) การศึกษาของ Laik et al. (2009) ชี้ให้เห็นว่ามวลชีวภาพจุลินทรีย์มีความสัมพันธ์อย่างสูงกับ DOC (ค่า r=0.978) นอกจากนี้มวลชีวภาพจุลินทรีย์ดิน (soil microbial biomass) ยังเป็นแหล่งสำคัญของ DOM เพราะมวลชีวภาพของจุลินทรีย์เป็นส่วนที่เปลี่ยนแปลงเร็ว (Kalbitz et al., 2000) ขณะที่สารที่รากพืชขับออกมา (root exudation) คือแหล่งสำคัญของคาร์บอนที่เข้าสู่ดิน และเป็นตัวทำให้เกิดกิจกรรมของจุลินทรีย์ (Kuzaykov, 2003; Dilkes et al., 2004) สารที่เปลี่ยนแปลงง่ายที่พบในสารที่รากขับออกมา ได้แก่ คาร์โบไฮเดรตที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และกรดอะมิโน อาจเพิ่มการหมุนเวียนคาร์บอนให้เร็วขึ้น และยังเป็นแหล่งสำคัญของ DOM ในดิน (Farrar et al., 2003)

ภาพที่ 2.1 แบบจำลองของกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการเกิด DOM และ SOM แหล่งของ DOM ได้มาจากซากพืช สารที่รากขับออกมา SOM และมวลชีวภาพชุลินทรีย์ (ภาพที่ 2.1) กระบวนการดังกล่าวนี้ (A) คือการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีของซากในระหว่างการย่อยสลาย การชะล้างของสาร (substances) จากซาก และการสร้างสารฮิวมิกที่ละลายน้ำได้ ความเข้มข้นของ DOM ในสารละลายดินอาจจะถูกควบคุมโดยกระบวนการที่ไม่มีสิ่งมีชีวิต (abiotic processes) (B) ได้แก่ ส่วนของ DOM ที่ไม่ถูกดูดซับและที่ละลายได้ DOM สามารถแบ่งได้เป็นส่วนที่เคลื่อนที่ได้และส่วนที่ไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าสู่ช่องว่าง (pore sizes) ในดินได้ DOM ส่วนที่เคลื่อนที่ได้จะถูกพบในช่องว่างขนาดใหญ่ (macropore) และช่องว่างขนาดกลาง (mesopore) ในดินเท่านั้น ซึ่งสามารถแยก DOM นี้ออกด้วยวิธีการ convective transport ขณะที่ DOM ที่อยู่ในช่องว่างขนาดเล็ก (micropore) ในดินจะเป็นส่วนที่เคลื่อนที่ไม่ได้และมีความสัมพันธ์กับส่วนที่เคลื่อนที่ได้ นั่นคือ DOM เหล่านี้จะถูกขนส่งเข้าสู่สารละลายดินในช่องว่างขนาดเล็ก (microspores) โดยกระบวนการแพร่ (diffusion process) ซึ่งสามารถถูกย่อยสลายได้ (C) หรือถูกย้ายออกจากสารละลายดินโดยกระบวนต่างๆ ที่หลากหลาย และ DOM ที่มีศักยภาพพอจะสามารถกลับเข้ามาในสารละลายดินในช่องว่างขนาดเล็กได้อีกครั้ง (B) (Kalbitz et al., 2000)



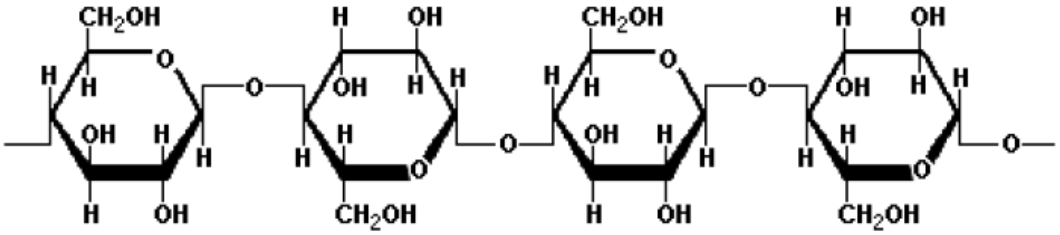
ภาพที่ 2.1 แบบจำลองของกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสร้าง DOM และ SOM

2.1.3 อิทธิพลของคุณภาพของซากพืชต่อการเปลี่ยนแปลง DOM

คุณภาพของซากอินทรีย์ (litter) เป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุม DOM ในสารละลายดิน คุณภาพที่ว่านี้หมายถึงส่วนประกอบทางเคมี ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต เซลลูโลส ลิกนิน และโพลิฟีนอลส์ องค์ประกอบทางเคมีเหล่านี้มีบทบาทสำคัญสำหรับควบคุมความเข้มข้น DOM (Kuiters, 1993) ในแต่ละขั้นตอนของการสลายตัว เช่น สารประกอบของคาร์โบไฮเดรตและเซลลูโลสที่ถูกพิจารณาให้เป็นแหล่งของ SOM ส่วนที่เปลี่ยนแปลงง่าย ในขณะที่สารประกอบของลิกนิน และโพลิฟีนอลส์จะถูกปล่อยออกมาในระยะสุดท้ายของการย่อยสลาย ซึ่งส่งผลให้ DOM สูงในระยะดั่งกล่าว อย่างไรก็ตาม ตัวชี้วัดของ C/N มีความสำคัญต่อความเข้มข้นของ DOM และ mineralization ของคาร์บอนและไนโตรเจน

คาร์โบไฮเดรต (น้ำตาลแซกคาไรด์; saccharide) คือสารประกอบอินทรีย์ ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม คือ มอนอแซ็กคาไรค์ (monsaccharide) ไดแซ็กคาไรด์ (disaccharide) โอลิโกแซ็กคาไรด์ (oligosaccharide) และโพลีแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) โดยเฉพาะคาร์โบไฮเดรตที่ละลายได้ (เช่น มอนอแซ็กคาไรด์ ไดแซ็กคาไรด์ โอลิโกแซ็กคาไรด์ และบางส่วนของโพลีแซ็กคาไรด์) และกรดอะมิโน (amino acid) เป็นสารประกอบที่จุลินทรีย์นำไปใช้ โดยเฉพาะในระยะแรกของการย่อยสลาย (Amon et al., 2001) สารประกอบที่ละลายเป็นผลมาจากการชะล้าง เป็นแหล่งสำคัญต่อการหมุนเวียนคาร์บอน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ใบสดที่เป็นที่รู้จักว่าเป็นแหล่งในการสร้าง DOM ที่เปลี่ยนแปลงง่าย (Kirchman, 2003) นอกจากนี้ Kalbitz et al., (2003) ที่ตรวจสอบการสลายตัวทางชีวภาพของ DOM เปิดเผยว่าขนาดและอัตราของการสลายตัวของ DOM จากวัสดุอินทรีย์ที่อยู่ในรูปฮิวมิก (fumified organic material) น้อย (ข้าวโพด ฟางข้าว ซากที่ปกคลุมผิวดิน [Oi-spruce, Oi-beech]) ส่งผลให้ 61-93% ของ DOC ถูก mineralize ในระยะแรก (2-5 วัน)

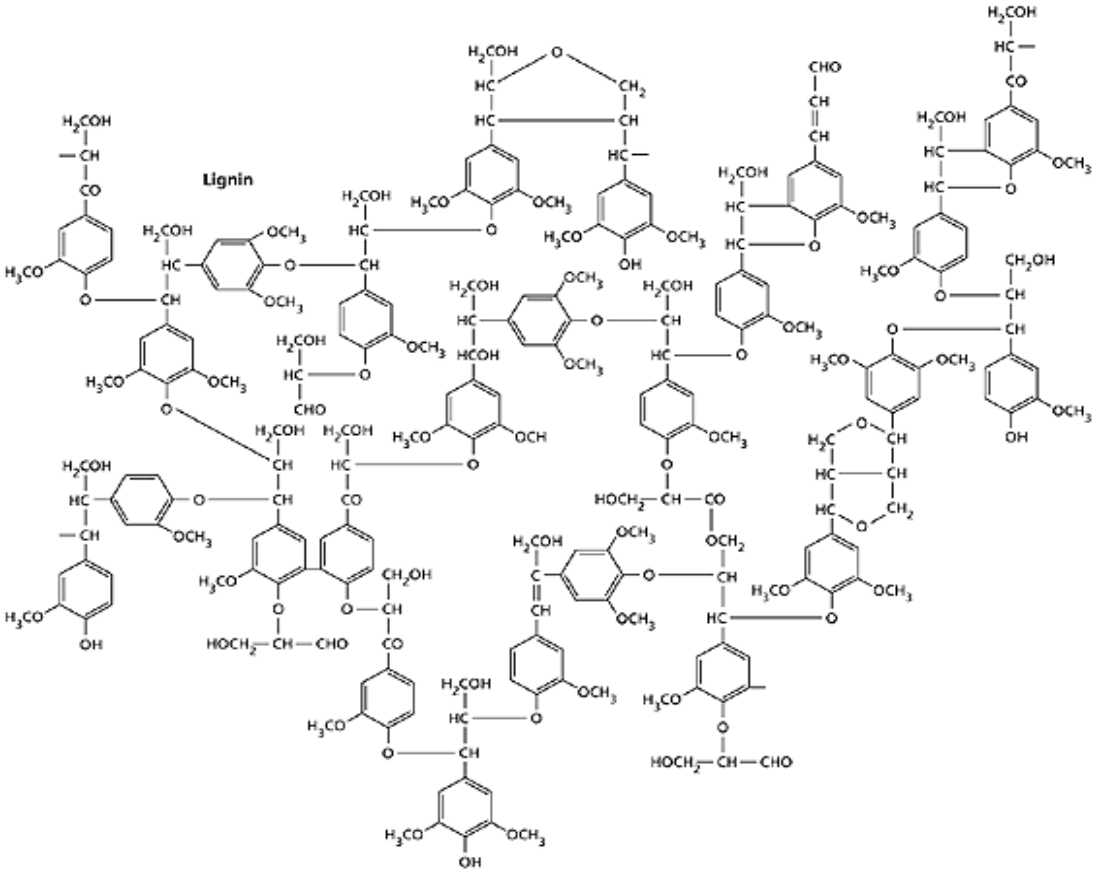
เซลลูโลส คือคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวมากกว่า 10 หน่วยขึ้นไป (polysaccharide) เป็นส่วนประกอบในผนังเซลล์ของพืช (cell wall) เกิดจากหน่วยของ D-กลูโคส มาจับต่อกันด้วยพันธะ β-1,4-ไกลโคซิดิก (β-1,4-glycosidic bonds (ภาพที่ 2.2) (Sjostrom, 1993)



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างเซลลูโลส
แหล่งที่มา: Sjostrom (1993)

เซลลูโลสเป็นแหล่งสำคัญของ DOM เพราะเซลลูโลสสามารถย่อยสลายได้อย่างรวดเร็ว ฟางข้าวมีเซลลูโลสสูงจึงมีอัตราการย่อยสลายที่เร็วที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระยะแรกของการย่อยสลาย (Puttaso et al., 2011) การย่อยสลายตัวอย่างรวดเร็วของฟางข้าว (rice straw: RS) น่าจะมาจากความเข้มข้น DOC ที่สูงในสารละลายดินที่ระยะแรก สอดคล้องกับ Katoh et al. (2005) การสลายตัวที่รวดเร็วของฟางข้าวโดยจุลินทรีย์ (microorganism) ในช่วงแรก (3 วัน) ของการทดลองส่งผลให้เกิดการผลิต DOC ที่เพิ่มขึ้น

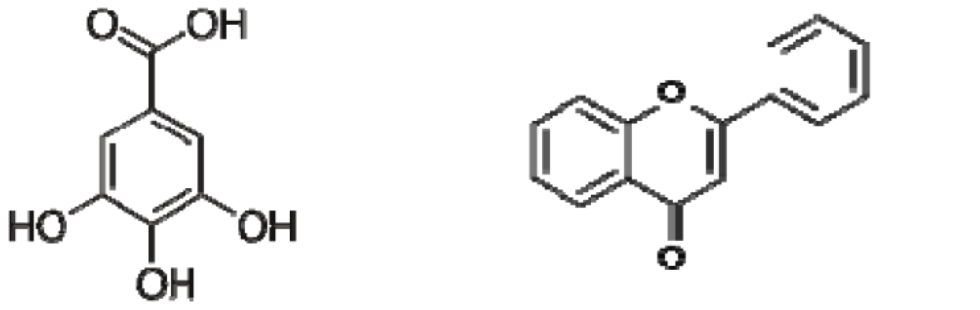
ลิกนิน เป็นสารประกอบที่ซับซ้อนส่วนมากเป็นส่วนประกอบของเนื้อไม้ที่สุดที่ได้จากไม้และเป็นส่วนหนึ่งของผนังเซลล์ชั้นที่ 2 (Secondary cell wall) ของพืช ลิกนินเป็นโมเลกุล racemic cross - linked กับกลุ่มโมเลกุลในส่วนที่เกิน 10,000 หน่วย (ภาพที่ 2.3)



ภาพที่ 2.3 สูตรโครงสร้างของลิกนินในพืช beech (*Fagus sylvatixa*) ในทวีปยุโรป
แหล่งที่มา: Taiz and Zeiger (2002)

ลิกนินค่อนข้างชอบน้ำและมีกลิ่นหอมในธรรมชาติ (Glazer and Nilaido, 1995) นอกเหนือจากนี้ลิกนินยังมีบทบาทสำคัญในการย่อยสลายซากพืชและซากสัตว์ (Berg and McClaugherty, 2003) และมีความสำคัญต่อการสร้าง DOM Kalbitz et al. (2000) รายงานว่า สัดส่วนของลิกนินที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้สารประกอบเชิงซ้อนวงแหวน (aromatic compound) มีสูงขึ้นในช่วงท้ายของการย่อยสลายสารอินทรีย์ Kalbitz et al. (2006) ได้ข้อสรุปเหมือนกันว่าการผลิต DOC จากซากพืชซากสัตว์มาจากการย่อยสลายลิกนินที่มากขึ้นในขั้นตอนสุดท้ายของการย่อยสลาย เช่นเดียวกับ Don and Kalbitz (2005) ที่ตั้งข้อสังเกตว่าการเพิ่มขึ้นของสารประกอบเชิงซ้อนวงแหวน ส่งผลให้ความเข้มข้นของ DOC เพิ่มสูงขึ้น หลังจากการสูญเสียมวลเกิน 20% ในระหว่างการบ่มเดือนที่ 27 ของวัสดุอินทรีย์ในดิน

โพลีฟีนอลส์ในพืชจะมีอยู่อย่างแพร่หลายในอาณาจักรพืช (the plant kingdom) โพลีฟีนอลส์ (ประกอบด้วย แทนนิน: tannin) ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ (polymer) ของสารประกอบฟีนอลส์ (phenols compound) (ฟีนอลส์ เป็นสารกลุ่ม aromatic benzene ที่จับกับกลุ่ม OH) มี 2 ประเภท คือ **ไฮโดรไลซ์แทนนิน (hydrolysable tannins)** และ **คอนเดนส์แทนนิน (condensed tannins)** (ภาพที่ 2.4) hydrolysable tannins คือ อนุพันธ์ของกรดแกลลิก (gallic acid) (3, 4, 5-trihydroxyl benzonic acid) ในขณะที่ condensed tannins เปนสารที่มีโมเลกุลใหญเปนพอลิเมอร (polymer) ของสารประกอบฟนอลส์ (phenolic compounds) มีสูตรโครงสร้างเกี่ยวพันกับสารพวกฟลาโวนอยด (polymeric flavanoids)

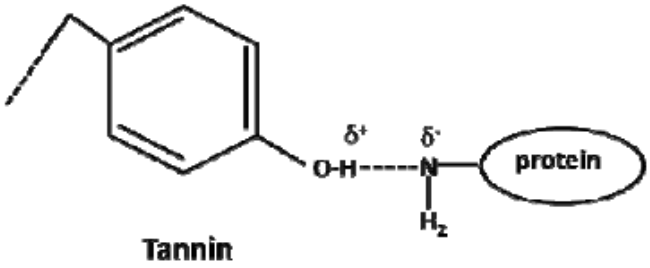


Gallic acid (hydrolyzable tannins) Flavone (condensed tannins)

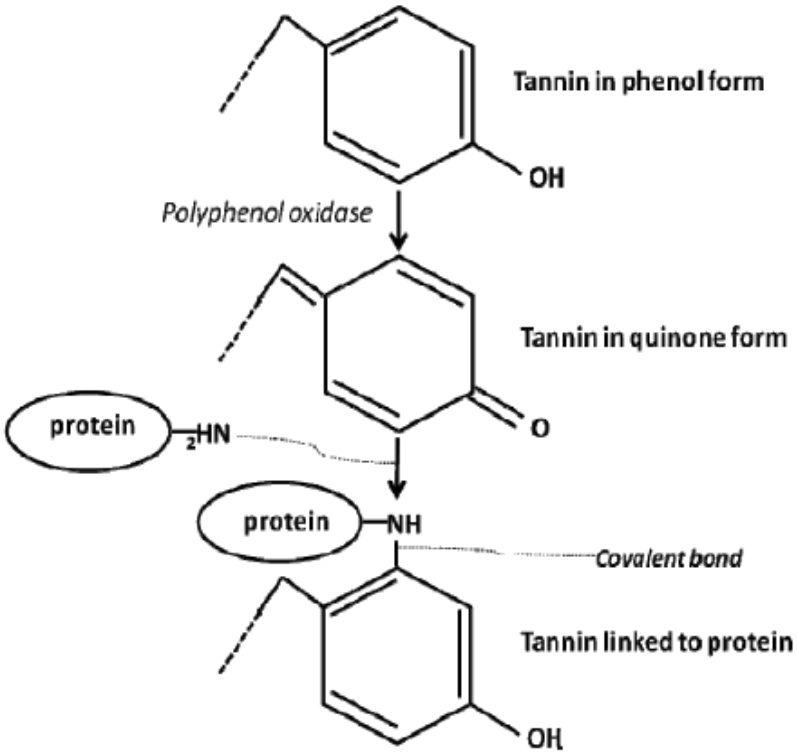
ภาพที่ 2.4 Hydrolyzable and condensed tannins
แหล่งที่มา: Taiz and Zeiger (2002)

โพลีฟีนอลส์ (polyphenols) ถูกพบว่ามีอิทธิพลต่อการย่อยสลาย (Palm and Sanchez, 1991) และกระบวนการ N mineralization ในซากพืชตระกูลถั่ว (Legume litter) (Oglesby and Fownes, 1992) (ภาพที่ 2.5) (Handayato et al., 1997; Taiz and Zeiger, 2002) สอดคล้องกับ Nierop et al. (2006) พบว่าสารประกอบฟีโนลิก (phenolic compounds) โดยเฉพาะอย่างยิ่งแทนนิน (tannins) ได้รับการแสดงว่ามีผลต่อการปลดปล่อยคาร์บอนและไนโตรเจน (mineralization C และ N) จากโปรตีนเชิงซ้อน (complexing proteins) และสารประกอบอื่นๆ ที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ อาจจะก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ (microbes) และยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์ในดิน ทำนองเดียวกับ Adamczyk et al. (2009) รายงานว่าสารประกอบเชิงซ้อน protein-tannin เป็นสารที่ต้านทานต่อการย่อยสลาย เนื่องจากเอนไซม์ไม่สามารถย่อยสลายและแยกโปรตีนออกจาก

สารประกอบเชิงซ้อน protein-tannin นี้ได้ โปรตีนที่มีพันธะกับโพลีฟีนอลส์จะส่งผลให้เกิดการย่อยสลายต่ำกับความเข้มข้นของ DON ลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง condensed tannins ที่มีความสามารถจับกับโปรตีนมากกว่า hydrolyzable tannins ประมาณ 25% (Mutabaruka et al., 2007)



(A) Hydrogen bonding between tannins and protein



(B) Covalent bonding to protein after oxidation

ภาพที่ 2.5 ปฏิสัมพันธ์ของแทนนิน (tannins) ที่มีต่อโปรตีน (proteins)
แหล่งที่มา: Taiz and Zeiger (2002)

สุดท้ายนี้ C/N ratio มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญเชิงลบกับกระบวนการปลดปล่อยไนโตรเจน (N mineralization) (Puttaso et al., 2011; Vityakon, 2007; Vityakon et al., 2000) โดย Sakala et al. (2000) ได้ศึกษาการใช้ใบของถั่วมะแฮะ (senesced pigeonpea leaves) (C/N ratio=24) และซากข้าวโพด (C/N ratio=75) พบว่าใบของถั่วมะแฮะชักนำให้เกิดการตรึงไนโตรเจน (N immobilization) เป็นระยะเวลาสั้นๆ หลังจากนั้นจึงเกิดกระบวนการปลดปล่อยไนโตรเจนสุทธิ (net nitrogen mineralization) ที่คงที่ ในขณะที่ข้าวโพดส่งผลให้เกิดการตรึงมากกว่า 16 เดือน เช่นเดียวกับ Gentile et al. (2009) รายงานว่าการใส่ซากบัวตอง (tithonia; *Tithonia diversifolisa*) ที่มีคุณภาพสูง (C/N ratio=13:1) แสดงให้เห็นว่ามีการปลดปล่อยไนโตรเจนอย่างรวดเร็ว 22 กิโลกรัมไนโตรเจน/เฮกตาร์ ในขณะที่ซากข้าวโพด (*Zea nays*) ที่มีคุณภาพต่ำ (C/N ratio=42:1) มีการตรึง (immobilization) ไนโตรเจน 34 กิโลกรัมไนโตรเจน/เฮกตาร์ เพราะฉะนั้นสารอินทรีย์ที่มีค่า C/N ต่ำ มีผลทำให้ความเข้มข้นของ DON และการปลดปล่อยไนโตรเจน (N mineralization) สูง Smolander and Kitunen (2002) ได้ทำการศึกษาการบ่มดินที่ได้จากชั้นฮิวมัส (humus) ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน (aerobic condition) เป็นเวลา 3 วัน พบว่าดินมีค่า C/N สูง ส่งผลให้ความเข้มข้น DON และมวลชีวภาพของจุลินทรีย์สูง อย่างไรก็ตาม Puttaso et al. (2011) รายงานว่าฟางข้าวซึ่งมีเซลลูโลสสูงจะให้ค่า C/N สูง ส่งผลให้การย่อยสลายเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะแรก

2.1.4 อิทธิพลของสิ่งแวดล้อมต่อการเปลี่ยนแปลงของ DOM

2.1.4.1 pH ของดิน

pH ของดินเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อความสามารถในการละลายและการสร้าง DOC นอกจากนี้ยังมีสำคัญต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ด้วย Kemmtii et al. (2006) รายงานว่า pH ของดินมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติดินด้านต่างๆ ของดิน ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับประชากรและความสามารถของจุลินทรีย์ในการใช้คาร์บอน และไนโตรเจน นอกจากนี้ยังพบว่าความเป็นกรดของดินที่เพิ่มขึ้นอาจลดกิจกรรมของจุลินทรีย์ ในขณะที่มวลชีวภาพคาร์บอน และไนโตรเจนของจุลินทรีย์ จะเพิ่มขึ้นตามค่า pH ของดิน

นอกเหนือจากนี้การศึกษาอื่นๆ ที่แสดงให้เห็นว่า DOC ถูกปล่อยออกมาจากชั้นดินอินทรีย์ (organic soil horizon) มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับ pH ของดิน (Kalbitz et al., 2000) สอดคล้องกับ Tipping and Woof (1990) พบว่าการเพิ่ม pH ของดิน 0.5 หน่วยจะนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของอินทรียวัตถุจะถูกเคลื่อนย้ายได้ 50% เช่นเดียวกับ Andersson et al. (2000) พบว่า DOC และ DON ถูกชะล้างเพิ่มขึ้นเมื่อ pH และอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นในระหว่างการบ่มในห้องปฏิบัติการที่ถูกจำลองเหมือนสภาพหรือสถานการณ์จริง อย่างไรก็ตาม Curtin et al. (1998) ไม่พบความสัมพันธ์ระหว่าง pH ของดิน (ค่า pH ที่อยู่ระหว่าง 5.1 ถึง 7.9) กับอัตราการปลดปล่อยไนโตรเจน (N mineralization rate) ที่ได้จากตัวอย่างดินจากการเกษตร 61 ตัวอย่าง จากประเทศแคนาดา

2.1.4.2 ความชื้นดิน (soil moisture)

ความชื้นของดินมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของ DOC ในดินที่มีการระบายน้ำดี เพราะเมื่อความชื้นของดินเพิ่มขึ้นจะสามารถเอื้อให้เกิดกิจกรรมของจุลินทรีย์ ซึ่งจะเป็นการเพิ่มสารประกอบอินทรีย์ละลายน้ำ (water-soluble organic compound) ในภายหลัง (Kalbitz et al., 2000) มีการศึกษากันอย่างแพร่หลายที่ค้นพบว่าความเข้มข้นของ DOC มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในระหว่างที่ดินเปียกอีกครั้งหลังจากที่ดินแห้ง ซึ่งอาจเป็นเพราะอัตราการย่อยสลายที่ลดลงในพื้นที่ที่แห้ง

เนื่องมาจากผลผลิตที่เกิดขึ้นจากจุลินทรีย์จะถูกเก็บสะสมไว้ในเซลล์ของจุลินทรีย์ เมื่อจุลินทรีย์เหล่านี้ตายและเซลล์ของจุลินทรีย์แตก สิ่งเหล่านี้จะไปเพิ่มความเข้มข้นของ DOC ในสารละลายดินในช่วงที่ดินเปียกอีกครั้งหลังจากที่ดินแห้ง (Kalbitz et al., 2000) Lundquist et al. (1999) ได้อธิบายถึงความเป็นไปได้ที่เป็นการเพิ่ม DOC ในช่วงที่ดินเปียกอีกครั้งหลังจากที่ดินแห้ง (i) จุลินทรีย์มีการใช้ DOC ลดลงในช่วงแห้งแล้ง (ii) การเปลี่ยนแปลงที่ช่วยเพิ่มของมวลชีวภาพจุลินทรีย์และการเพิ่มของจุลินทรีย์ระหว่างที่ดินเปียกอีกครั้งหลังจากที่ดินแห้ง (iii) โครงสร้างดินที่เสียไปทำให้คาร์บอนที่ถูกกักเก็บไว้ก่อนหน้านี้เป็นประโยชน์มากขึ้นในรูปของ DOC

2.1.4.3 อุณหภูมิ (Temperature)

ในการศึกษาหลายแหล่ง การชะล้างของ DOC จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น (Christ and David, 1996) Kalbitz et al. (2000) รายงานว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่ควบคุมการเกิดของจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิด DOC โดยทั่วไปความเข้มข้น DOC และ DON ในสารละลายดินจะเพิ่มสูงขึ้นในช่วงฤดูร้อนถึงช่วงฤดูหนาว (Tipping et al., 1999) ในทำนองเดียวกัน Cronan and Aiken (1985 อ้างตาม Kalbitz et al., 2000) พบว่าค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของ DOC เพิ่มขึ้นจาก 26% เป็น 32% ในสารละลายดินที่อยู่ตื้นในช่วงฤดูร้อน แต่ความเข้มข้นของ DOC ในชั้นดิน B (B horizon) ยังคงที่ ในขณะที่ Laik et al. (2009) รายงานว่าความเข้มข้นสูงสุดของ DOC จะพบในช่วงฤดูร้อน (35 $^{\circ}$C) และต่ำที่สุดในช่วงฤดูหนาว (25 $^{\circ}$C) การเพิ่มขึ้นของ DOC ในช่วงฤดูร้อนเป็นผลมาจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นจึงมีผลกระทบต่อกิจกรรมของจุลิทรีย์ในดินต่อการย่อยสลายวัสดุอินทรีย์

2.2 การสร้างแบบจำลอง (modeling of SOM data) เพื่อศึกษาการสลายตัวและการสะสมอินทรียวัตถุหลังการใส่สารอินทรีย์อย่างต่อเนื่องระยะยาวในดินทราย

ในปัจจุบันมีการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในด้านต่างๆ เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเพื่อคาดการณ์เหตุการณ์ที่จะเกิดขึ้นในอนาคต เช่นเดียวกับการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณอินทรียวัตถุในดินโดยนำแบบจำลองมาใช้ในการคาดการณ์ปริมาณอินทรียวัตถุในระยะยาว ซึ่งการสร้างแบบจำลองจะทำบนพื้นฐานความเข้าใจของการแบ่งอินทรียวัตถุเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เปลี่ยนแปลงง่ายและส่วนที่เปลี่ยนแปลงยาก การแบ่งอินทรียวัตถุออกเป็นส่วนๆ ตามอัตราการเปลี่ยนแปลง (ย่อยสลาย) ขององค์ประกอบอินทรีย์แต่ละส่วน ทำให้สามารถนำไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

2.2.1 การจำแนกอินทรียวัตถุ

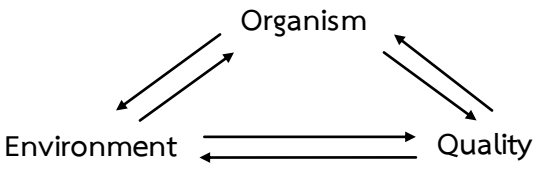
การแบ่งอินทรียวัตถุตามเงื่อนไขอัตราการย่อยสลายหรือตามพลวัตของการเปลี่ยนแปลง สามารถแบ่งได้ดังนี้

- ส่วนที่เปลี่ยนแปลงง่าย (labile pool) ส่วนที่เปลี่ยนแปลงง่ายประกอบไปด้วยซากพืช ซากสัตว์และจุลินทรีย์ต่างๆ บทบาทที่สำคัญของอินทรียวัตถุส่วนนี้คือช่วยในการหมุนเวียนและปลดปล่อยธาตุอาหารให้กับดิน
- ส่วนที่เปลี่ยนแปลงยาก (stable pool) ประกอบไปด้วยสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่มีความซับซ้อน มีความคงทนต่อการถูกย่อยสลายจากจุลินทรีย์ เนื่องจากได้รับการป้องกันทางเคมีและกายภาพ

ซึ่งการจำแนกแบบนี้จะเป็นพื้นฐานในการสร้างแบบจำลอง (simulation model) เพื่อศึกษาการสลายตัวของอินทรียวัตถุในดิน เนื่องจากมีข้อดีด้านการคิดคำนวณทางคณิตศาสตร์ เพราะสามารถอธิบายอัตราการเปลี่ยนแปลงอินทรียวัตถุที่ซับซ้อนได้ (ปัทมา, 2547)

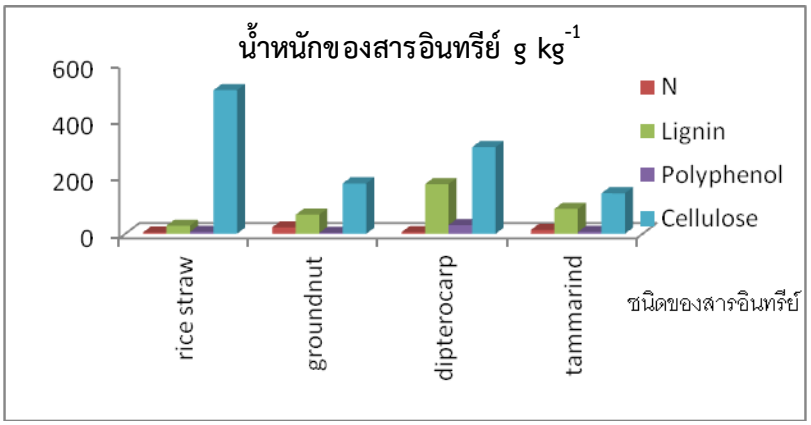
2.2.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการย่อยสลายอินทรียวัตถุในดิน

การสะสมอินทรียวัตถุในดินได้มาจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ถูกนำเข้าสู่ระบบดิน ดังนั้นปริมาณการสะสมอินทรียวัตถุในดินจึงขึ้นอยู่กับอิทธิพลที่มีต่อกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยซึ่งการเกิดกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้รับอิทธิพลจากทั้งปัจจัยภายในหรือปัจจัยคุณภาพสารอินทรีย์ซึ่งเป็นแหล่งอาหารและพลังงาน และปัจจัยภายนอกหรือปัจจัยสภาพแวดล้อม เช่น เนื้อดิน ความชื้น สภาพภูมิอากาศ เป็นต้น ซึ่งอาจเป็นปัจจัยที่ส่งเสริมหรือชะลอการย่อยสลาย นอกจากนี้ยังมีจุลินทรีย์ที่มีบทบาทโดยตรงต่อกระบวนการย่อยสลาย ซึ่งทั้ง 3 ปัจจัยดังกล่าวนี้มีปฏิสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน (พจนีย์, 2551) ตัวอย่างเช่น สารอินทรีย์ที่คุณภาพต่ำคือมีอัตราส่วนของ C/N สูงจะทำให้ย่อยสลายยาก เนื่องจากว่าสารอินทรีย์มีองค์ประกอบทางเคมีที่คงทนต่อการเข้าทำลายหรือย่อยสลายโดยจุลินทรีย์และสัตว์ที่อยู่ในดิน ทำให้มีการสะสมอินทรียวัตถุขนาดใหญ่ในปริมาณที่มาก เป็นต้น



2.2.2.1 องค์ประกอบทางเคมีที่มีผลต่อการย่อยสลายและสะสมอินทรียวัตถุในดิน

คุณภาพสารอินทรีย์ หมายถึง องค์ประกอบทางเคมีต่างๆ เช่น ไนโตรเจน คาร์บอน ลิกนิน เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส เป็นต้น องค์ประกอบเหล่านี้ใช้เป็นตัววัดกระบวนการย่อยสลายและปลดปล่อยธาตุอาหารของวัสดุอินทรีย์ (นิตยา, 2545) ซึ่งสารอินทรีย์แต่ละชนิดจะมีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันดังภาพที่ 2.6 แสดงปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีในสารอินทรีย์ต่างชนิดกัน



ภาพที่ 2.6 ปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีในสารอินทรีย์ต่างชนิดกัน
ดัดแปลงจาก; Puttaso et al. (2011)

พืชมีคาร์บอนและไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบพื้นฐานของโปรตีน คาร์โบไฮเดรต และกรดนิวคลีอิค (Goodwin and Mercer, 1983 อ้างตามพจนีย์, 2551) ซึ่งองค์ประกอบพื้นฐานเหล่านี้เมื่อพิจารณาในสารอินทรีย์แต่ละชนิดจะมีประเภทและปริมาณที่แตกต่างกัน ซึ่งจะแปรผันตามอายุของพืชที่เพิ่มขึ้นด้วย เช่นองค์ประกอบทางเคมีที่เป็น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน จะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นตามอายุที่เพิ่มขึ้น (พจนีย์, 2551)

เม็ดดินเป็นแหล่งการสะสมคาร์บอนในดินทั้งนี้เนื่องจากว่าอินทรียวัตถุมีบทบาทในการเกิดเม็ดดิน โดยจะเป็นสารเชื่อมอนุภาคดินให้รวมกันเป็นเม็ดดิน ทำอินทรียวัตถุที่อยู่ข้างในเม็ดดินถูกปกป้องจากจุลินทรีย์ดังนั้นจึงเป็นการสงวนอินทรียวัตถุไว้ในดิน (สมญา, 2545) จากการศึกษาของปัทมาและอรรณพ (2552) พบว่าการสะสมอินทรีย์ในเม็ดดินขนาดต่างๆ มีความสัมพันธ์กับคุณภาพสารอินทรีย์ กล่าวคือ สารอินทรีย์ที่ย่อยลสลายยาก ได้แก่ พลวง ซึ่งมีปริมาณลิกนินและโพลีฟีนอลส์สูงจะค่อยๆ สลายตัวทำให้คาร์บอนสะสมอยู่ในเม็ดดินขนาดใหญ่ (large- macroaggregate) (>2 มิลลิเมตร) และสารอินทรีย์ที่มีปริมาณไนโตรเจนปานกลางถึงสูงและปริมาณลิกนินและโพลีฟีนอลส์ปานกลาง ได้แก่ ซากถั่วลิสงและใบมะขาม จะสะสมในเม็ดดินขนาดเล็กมาก (microaggregate) (0.053-0.25 มิลลิเมตร) โดยปริมาณอินทรีย์คาร์บอน (SOC) และอินทรีย์ไนโตรเจน (SON) ที่สะสมอยู่ในดินมีสหสัมพันธ์กับองค์ประกอบทางเคมีเริ่มต้นของสารอินทรีย์ ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในดินมีสหสัมพันธ์ทางบวกกับปริมาณคาร์บอนเริ่มต้นและมีปฏิสัมพันธ์ทางลบกับอัตราส่วน C/N สอดคล้องกับการศึกษาของสุนทรีย์ (2543) ที่ศึกษาการสะสมอินทรีย์คาร์บอนในสารอินทรีย์ชนิดเดียวกันโดยพบว่าเศษซากที่มีอัตราส่วน C/N กว้างจะส่งผลให้สะสมในอินทรียวัตถุอนุภาคดินขนาด 0.25-1 มิลลิเมตร มีมากกว่าเศษซากพืชที่มีอัตราส่วน C/N แคบ

2.2.2.2 ปัจจัยสิ่งมีชีวิตในดินที่มีผลต่อการย่อยสลายอินทรียวัตถุในดิน

สิ่งมีชีวิตในดินได้แก่ สัตว์ในดิน เช่น ไส้เดือนดิน หนอน แมลงปีกแข็ง และกิ้งกือ รวมทั้งจุลินทรีย์ในดิน โดยเฉพาะจุลินทรีย์ที่อยู่ในดินจะใช้องค์ประกอบทางเคมีของสารอินทรีย์เป็นอาหาร ก่อให้เกิดการเปลี่ยนรูปของคาร์บอนและไนโตเจนหรือช่วยในการอนุรักษ์ธาตุอาหารไว้ในดินโดยนำไปใช้สร้างมวลชีวภาพจุลินทรีย์ระหว่างที่สารอินทรีย์ถูกย่อยสลาย สารอินทรีย์ที่มีคุณภาพต่างกันมีผลทำให้จุลินทรีย์เกิดกิจกรรมการย่อยสลายโดยดูจากการปลดปล่อย CO_2 ที่ต่างกัน (พจนีย์, 2551) ซึ่งการวัดปริมาณ CO_2 เป็นตัวชี้วัดกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดิน ซึ่ง CO_2 ได้มาจากกระบวนการหายใจของจุลินทรีย์โดยใช้ O_2 ในการย่อยสลายหรือเกิดกระบวนการ oxidation สารประกอบคาร์บอนได้ผลลัพธ์เป็นดังสมการ

$$(CH_2O)_x + O_2 \longrightarrow CO_2 + H_2O + \text{พลังงาน}$$

2.2.2.3 ปัจจัยสภาพแวดล้อมที่มีผลต่อการย่อยสลายอินทรียวัตถุในดิน

สภาพแวดล้อมทางดินเป็นปัจจัยภายนอกที่มีอิทธิพลต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ เช่น เนื้อดิน ปฏิกิริยาของดิน และความชื้นดิน เป็นต้น (พจนีย์, 2551) ซึ่งจะส่งผลต่อการสะสมอินทรียวัตถุที่อยู่ในดินด้วย ดังเช่นในสภาพแวดล้อมที่มีเนื้อดินต่างกัน ดินที่มีเนื้อละเอียดจะมีปริมาณอินทรีย์คาร์บอนสูงกว่าดินเนื้อหยาบ ทั้งนี้เนื่องจากดินเนื้อละเอียดมีการป้องกันทางกายภาพมากกว่าดินเนื้อหยาบกล่าวคือในดินเนื้อละเอียดอินทรีย์คาร์บอนจะถูกสะสมไว้ในช่องว่างที่มีขนาดเล็ก ทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถเข้าย่อยสลายได้ (Hassink, 1994) นอกจากนี้อินทรียวัตถุยังสร้างเป็นสารประกอบเชิงซ้อน

กับสารอินทรีย์ที่อยู่บนแร่ดินเหนียวซึ่งมีผลทำให้อินทรียวัตถุส่วนนี้ซึ่งยึดติดกับแร่ดินเหนียวมีความคงทนมากยากต่อการย่อยสลายจากเอนไซม์ของจุลินทรีย์ดิน (สมญา, 2545)

2.2.3 แบบจำลอง (Model)

2.2.3.1 ความหมายของแบบจำลอง (Model)

แบบจำลอง (Model) เริ่มใช้ตั้งแต่ปี 1970 ซึ่งใช้แทนคำว่า“ทฤษฎี หรือ สูตร”บอกเป็นนัยถึงความพยายามในการจำลองภาพ เหตุการณ์/กระบวนการทางธรรมชาติที่เกิดขึ้น โดยทำให้อยู่ในรูปง่ายๆ ที่สามารถเข้าใจและเลียนแบบพฤติกรรมนั้นๆได้ (นิพนธ์, 2545)

2.2.3.2 แบบจำลองอินทรียวัตถุ (soil organic matter model)

2.2.3.2(ก) ความเป็นมาและการพัฒนาแบบจำลองอินทรียวัตถุ

แบบจำลองอินทรียวัตถุในดินถูกใช้อย่างกว้างขวางเมื่อประมาณ 30 ปีที่แล้ว ซึ่งช่วยเพิ่มความเข้าใจในเรื่องความเคลื่อนไหวเปลี่ยนแปลงของอินทรียวัตถุในดินมากขึ้น ซึ่งมีหลายแบบจำลองที่คาดการณ์การเปลี่ยนแปลงของอินทรียวัตถุที่อยู่ในดินของระบบปลูกพืชซึ่งค่อนข้างที่จะทำมากในระบบทุ่งหญ้า ทุ่งหญ้าเลี้ยงสัตว์ และป่าไม้ (Arah et al., 1997) ในการสร้างแบบจำลองอินทรียวัตถุจะทำบนพื้นฐานการแบ่งส่วนของอินทรียวัตถุตามพลวัตของการเปลี่ยนแปลง ที่ประกอบไปด้วยส่วนที่ว่องไวต่อการเปลี่ยนแปลง และส่วนที่ไม่ไวต่อการเปลี่ยนแปลง โดยที่ทั้ง 2 ส่วนมีความแตกต่างกันในเรื่องของเวลาที่ใช้ในการหมุนเวียน ซึ่งสอดคล้องกับงานของ Sitompul and Listyarini (1992) ที่ศึกษาการสร้างอินทรียวัตถุในดินโดยใช้แบบจำลองในการทำนาย ซึ่งสร้างแบบจำลองบนพื้นฐานการแบ่งอินทรียวัตถุเป็น 2 ส่วนคือ อินทรียวัตถุทั้งหมดในดินได้มาจากการย่อยสลายของอินทรียวัตถุส่วนที่ย่อยสลายเร็วรวมกับส่วนที่ย่อยสลายช้า ทั้งนี้ก็มีความสอดคล้องกับข้อเสนอแนะของ Parton and Rasmussen (1994) ที่ได้เสนอว่าการสร้างแบบจำลองอินทรียวัตถุควรจะแบ่งอินทรียวัตถุเป็นส่วนที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลง ส่วนที่ไม่ไวต่อการเปลี่ยนแปลง และส่วนที่อยู่นิ่งไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งแนวคิดนี้ได้มาจากการตรวจสอบกลับการทำงานแบบจำลองของ Jenkinson and Rayner (1977) ซึ่งต่อมามีการพัฒนาแบบจำลองโดยรวมเอาผลของการปกป้องทางเคมีและกายภาพเข้ามารวมด้วย รวมทั้งปัจจัยด้านเนื้อดิน การชะล้างพังทลายดิน และการทำเขตกรรมเข้ามารวมด้วย (Jenkinson and Rayner, 1977 อ้างตาม Vityakon, 2011) ซึ่งปัจจัยที่กล่าวมานี้ล้วนแล้วแต่ มีผลต่อการสร้างแบบจำลองเพื่อคาดการณ์การหมุนเวียนเปลี่ยนแปลงของอินทรียวัตถุและการสะสมอินทรียวัตถุในดิน เมื่อเร็วๆ นี้ CENTURY model ได้รวมเอาผลจากการจัดการปลูกพืช การปฏิบัติต่อพืชที่ปลูก การใส่ปุ๋ย และการจัดการเศษซากพืชกลับคืนเข้าสู่ดิน เข้าไว้ในแบบจำลองอินทรียวัตถุ (Vityakon, 2011) ซึ่ง Mikhailova et al. (2000) กล่าวว่า ส่วนของอินทรียวัตถุที่เปลี่ยนแปลงยากจะขึ้นอยู่กับเนื้อดินและความเข้มข้นของอนุภาคดินเหนียว รวมทั้งองค์ประกอบภายในเศษซากพืช ได้แก่ ความเข้มข้นของลิกนินและไนโตรเจน ดังนั้นในสมการทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลองปัจจัยเริ่มต้นที่ใส่เข้าไปคือ ความชื้นของดิน อุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุด ปริมาณลิกนินและไนโตรเจนในเศษซากพืช นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้องกับการสลายตัวของอินทรียวัตถุอื่นๆ ที่ใส่เข้าไปในสมการด้วย ได้แก่ ปริมาณหยาดน้ำฟ้า อุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุด และค่าความหนาแน่นของดิน ทั้งนี้เนื่องจากปัจจัยทั้งหมดนี้มีผลต่อการย่อยสลายอินทรียวัตถุ ซึ่งจะไปมีผลต่อปริมาณการสะสมอินทรียวัตถุในดิน

2.2.3.2(ข) ประเภทของแบบจำลองเพื่อศึกษาอินทรียวัตถุในดิน

แบบจำลองสำเร็จรูป

แบบจำลองสำเร็จรูปคือ แบบจำลองที่ได้มีการสร้างโดยใส่ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสลายตัวของอินทรียวัตถุเข้าไว้แล้ว ซึ่งการใช้แบบจำลองเพื่อคาดการณ์ปริมาณอินทรียวัตถุในดินถ้าใช้แบบจำลองสำเร็จรูปที่ได้พัฒนามาแล้วควรจะต้องมีการปรับค่าปัจจัยต่างๆที่จะส่งผลต่อปริมาณการสะสมอินทรียวัตถุในดิน ทั้งนี้เพื่อให้ค่าที่ได้จากการคาดการณ์มีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองจริงมากที่สุดดังการศึกษาของ WU et al. (1998) ที่ศึกษาการเปลี่ยนแปลงอินทรียวัตถุดินในระบบการเพาะปลูกพืชหมุนเวียนในดินทรายภาคตะวันออกเฉียงเหนือ พบว่าค่าที่ได้จากการประเมินโดยใช้แบบจำลองมีค่าต่ำกว่าค่าจริง เนื่องมาจากดินขาดความชื้นเพราะว่าภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีบางช่วงเวลาที่เป็นฤดูแล้งการย่อยสลายจึงเป็นไปอย่างช้าๆ ดังนั้นการปรับค่าปัจจัยความชื้นลงจึงเป็นสิ่งที่จำเป็น โดยเฉพาะในพื้นที่ว่างเปล่าไม่มีพืชปกคลุมควรปรับค่าความชื้นลงเป็น 0.1 ส่วนบริเวณที่มีพืชคลุมดินควรปรับเป็น 0.2 ตัวอย่างแบบจำลองสำเร็จรูป ได้แก่ Rothamsted Carbon Model, DAISY Model และ CENTURY Model เป็นต้น

2.2.3.2(ค) แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมาเอง

ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาการสลายตัวของสารอินทรีย์ในดินและการสะสม SOM ส่วนใหญ่จะใช้สมการเอ็กซ์โพเนนเชียล (exponential) ในการอธิบายอัตราการย่อยสลายของสารอินทรีย์ซึ่งจะนำไปสู่การอธิบายการสะสมอินทรียวัตถุในดิน เนื่องจากสมการทางคณิตศาสตร์ประเภทนี้สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงได้ดีกว่าสมการประเภทอื่นๆ ยกตัวอย่างการศึกษาของ Puttaso et al. (2011) ซึ่งทำการศึกษาอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีคุณภาพต่างกัน ได้แก่ ฟางข้าว ซากถั่วลิสง ใบมะขาม และพลวง โดยการสร้างแบบจำลองขึ้นมาโดยใช้สมการ exponential ซึ่งพบว่าการใช้สมการที่มีองค์ประกอบส่วนเดียว (one-pool model) ไม่สามารถอธิบายอัตราการย่อยสลายได้ดีเท่ากับการใช้สมการที่มีสองส่วน (two-pool model) ทั้งนี้เนื่องจากว่าในสารอินทรีย์ประกอบไปด้วยส่วนที่เปลี่ยนแปลงง่ายและเปลี่ยนแปลงยาก ดังนั้นอัตราการย่อยสลายจึงต้องแบ่งเป็นสองส่วนด้วยเช่นกัน คือ k_1 และ k_2 โดยพบว่า k_1 ซึ่งเป็นอัตราการย่อยสลายในส่วนที่เปลี่ยนแปลงง่ายจะมีค่ามากกว่า k_2 ซึ่งเป็นอัตราการย่อยสลายในส่วนที่เปลี่ยนแปลงยาก โดยพบว่าเป็นแบบนี้ในทุกสารอินทรีย์ที่ศึกษา แต่ค่าอัตราการย่อยสลายจะแตกต่างกันในแต่ละสารอินทรีย์ เนื่องจากสารอินทรีย์แต่ละชนิดมีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน เช่นเดียวกับการสร้างแบบจำลองของ Sitompul and Listyarini (1992) ที่อธิบายว่าปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในดินทั้งหมด (TCL) ได้มาจากผลรวมของคาร์บอนในซากพืชส่วนที่ย่อยสลายเร็ว (rapidly decomposable C - RDC) กับส่วนที่ย่อยสลายช้า (slowly decomposable C - SDC) ซึ่งใช้สมการ exponential ในการอธิบายการย่อยสลายของสารอินทรีย์ดังนี้

$$TCL = RDC_0 e^{k1t} + SDC_0 e^{k2t}$$

โดยที่ k_1=-3.4

k_2=-0.18

ซึ่งจะเห็นได้ว่า k_1มีค่าอัตราการย่อยสลายสูงกว่า k_2 นั่นคือ สารอินทรีย์ในส่วนที่ย่อยสลายง่าย (RDC) จะมีอัตราการย่อยสลายที่สูงกว่าหรืออีกนัยหนึ่งคือมีอัตราการย่อยสลายเร็วกว่าส่วนที่ย่อยสลายช้า (SDC) นั่นเอง

2.3 การสลายตัวของฟางข้าวและการผสมฟางข้าวกับสารอินทรีย์ต่างคุณภาพ

การศึกษาการสลายตัวของสารอินทรีย์ (ฟางข้าว) ที่มีผลจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างลิกนินและเซลลูโลสต่อการสลายตัวของสารอินทรีย์ เป็นการศึกษาเพื่อนำมาปรับปรุงคุณภาพของดินทางด้านเคมี ชีวภาพ และกายภาพ เพื่อฟื้นฟูดินเสื่อมโทรมให้กลับคืนความอุดมสมบูรณ์ และทำให้เกิดการเก็บกักคาร์บอนในดินให้สูงขึ้น

2.3.1 องค์ประกอบของลิกนินและเซลลูโลสในสารอินทรีย์

2.3.1.1 ปริมาณสารประกอบทางเคมีบางประการของฟางข้าวและธัญพืช

ปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการสลายตัวของสารอินทรีย์คือปัจจัยด้านคุณภาพของสารอินทรีย์ โดยองค์ประกอบทางเคมีของฟางข้าวประกอบด้วย ไนโตรเจน คาร์บอน ลิกนิน โพลีฟีนอลส์ เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส เป็นต้น (นิตยา, 2545) ฟางข้าวมีปริมาณคาร์บอนสูงอยู่ในช่วง 367–423 g kg^{-1} มีปริมาณไนโตรเจนต่ำ 4.7–8.5 g kg^{-1} มีปริมาณเซลลูโลสสูง 353-507 g kg^{-1} และมีลิกนินต่ำ 19–45 g kg^{-1} (ตารางที่ 2.1) จากคุณสมบัติทางเคมีบางประการของฟางข้าวสามารถจำแนกได้ว่าฟางข้าวเป็นซากอินทรีย์ที่มีคุณภาพต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับซากอินทรีย์ชนิดอื่น เช่น ซากถั่วลิสง เป็นต้น (Samahadthai et al., 2010) คุณภาพของสารอินทรีย์สามารถจำแนกได้จาก 3 องค์ประกอบของสารอินทรีย์คือ ปริมาณไนโตรเจน ลิกนิน และโพลีฟีนอลส์ โดยสารอินทรีย์ที่มีปริมาณไนโตรเจนอย่างน้อย 2.5% มีปริมาณลิกนินน้อยกว่า 15% และปริมาณโพลีฟีนอลส์น้อยกว่า 4% มักถูกจำแนกไว้ในซากอินทรีย์คุณภาพสูง ในทางตรงกันข้ามหากสารอินทรีย์มีปริมาณไนโตรเจนน้อยกว่า 2.5% ถูกจำแนกไว้ในสารอินทรีย์คุณภาพต่ำ (Vityakon 2011; Plam et al., 1997) อัตราส่วนของ C/N ของฟางข้าวมีอัตราที่สูง แม้จะมีปริมาณคาร์บอนมากแต่มีปริมาณไนโตรเจนต่ำ

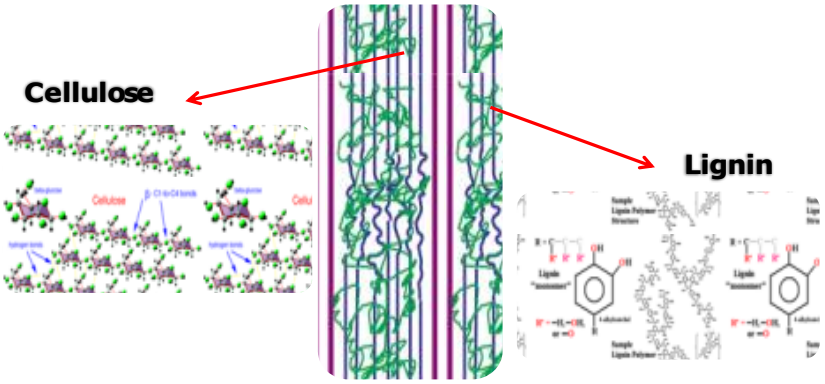
นอกจากนี้องค์ประกอบบางประการทางเคมีของธัญพืช (ฟางข้าวบาร์เลย์และฟางข้าวสาลี) ซึ่งเป็นพืชตระกูลเดียวกับข้าวและมีการเพาะปลูกคลอบคุลมทั่วโลกมีพื้นที่ปลูกข้าวบาร์เลย์ทั่วโลกมีพื้นที่เพราะปลูกประมาณ 66 ล้านเฮกตาร์ (Office of the gene technology regulator, 2008) โดยองค์ประกอบทางเคมีบางประการของธัญพืชพบว่ามีปริมาณลิกนินต่ำอยู่ในช่วง 50–98 g kg^{-1} และมีปริมาณเซลลูโลสสูงอยู่ในช่วง 362–415 g kg^{-1} (ตารางที่ 2.1) ธัญพืชมีองค์ประกอบทางเคมีคล้ายคลึงกับฟางข้าว

คุณภาพของสารอินทรีย์เป็นตัวบ่งชี้ถึงอัตราการสลายตัวของสารอินทรีย์ โดยมีความสัมพันธ์กันอย่างใกล้ชิดระหว่างลิกนินและเซลลูโลส ซึ่งลิกนินเป็นตัวป้องกันการสลายตัวของเซลลูโลส (Aber et al., 1990)

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางเคมีบางประการที่ใช้ในการชี้คุณภาพด้านการสลายตัวของฟางข้าว และธัญพืช

Residue	C	N	C/N	L	Pp	Cellulose	ที่มา
	g kg^{-1}			g kg^{-1}			
Rice straw	367	4.7	78.4	28.7	6.5	507	Puttaso et al. (2011)
Rice straw	390	5.6	69.6	19.0	8.0	474	Samahadthai et al. (2010)
Rice straw	423	8.5	49.7	-	-	353	Han and He (2010)
Rice straw	415	5.0	83.0	45.0	10.0	-	Kaewpradit et al. (2009)
Rice straw	390	4.9	79.0	36.0	14.8	-	Vityakon et al. (2000)
Rice	-	-	-	70.0	-	330	Theander and Aman (1984)
Rang	423-367	4.7-8.5	49.7-83.0	19-70	6.5-14.8	330-507	
Wheat straw	466	4.0	111.5	50.0	-	415	Henrisen and Breland (1999)
Wheat	-	-	-	97.0	-	362	Cottyn and de Boever (1988)
Wheat	-	-	-	95.0	-	391	Andrighetto and Cavalli (1988)
Rang	446	4.0	111.5	50-97	-	362-415	
Barley	-	-	-	97.0	-	445	Cottyn and de Boever (1988)
Barley	-	-	-	98.0	-	413	Givens et al. (1989)
Rang	-	-	-	97-98	-	413-415	

L= lignin, Pp = total extractable polyphenols



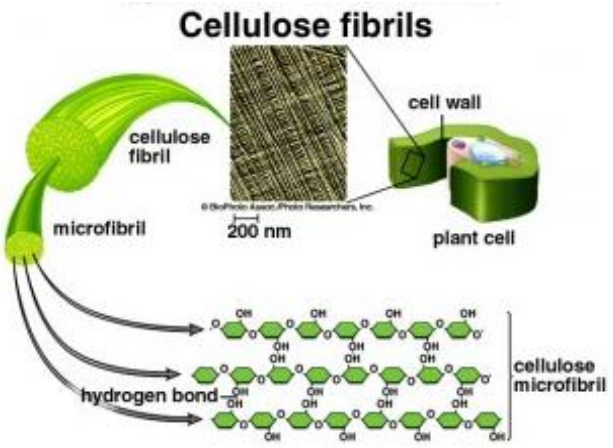
ภาพที่ 2.7 โครงสร้างภายในเซลล์พืช (ลิกนินและเซลลูโลส) ของฟางข้าว
ดัดแปลงจาก; Mosier et al., 2004

2.3.2 ปัจจัยด้านองค์ประกอบทางเคมีของสารอินทรีย์ที่มีอิทธิพลต่อการสลายตัวของเซลลูโลส

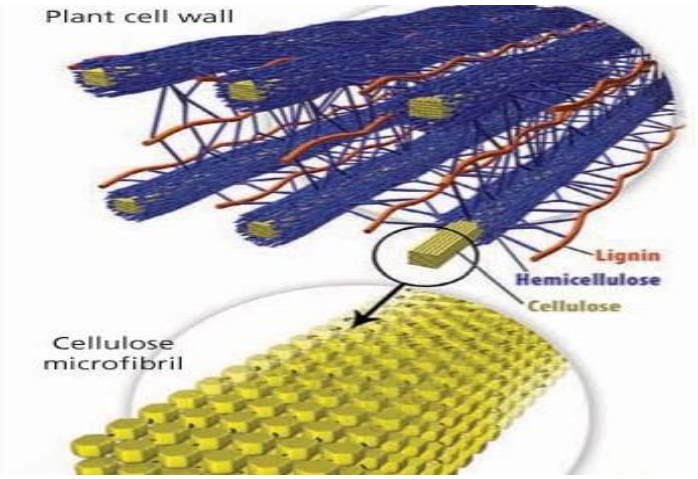
องค์ประกอบทางเคมีของสารอินทรีย์เป็นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อการสลายตัวของสารอินทรีย์ (Berget al.,1987,1995a; Berg and Laskowski,1997; Osono and Takeda, 2001; Fioretto et al., 2001, Fioretto et al., 2004) เมื่อพิจารณาจากองค์ประกอบทางเคมีของฟางข้าว เช่น ปริมาณของไนโตรเจน คาร์บอน ลิกนิน โพลีฟีนอลส์ เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส เป็นต้น ฟางข้าวเป็นอินทรียวัตถุที่สลายตัวได้ง่าย โดยมีองค์ประกอบทางเคมีในส่วนที่เปลี่ยนแปลงง่าย (labile pool) เช่น เซลลูโลส (cellulose) เป็นองค์ประกอบอยู่ในปริมาณที่สูง และมีปริมาณลิกนิน (lignin) ซึ่งเป็นองค์ประกอบทางเคมีที่ทนทานต่อการสลายตัว และช่วยปกป้องส่วนที่เปลี่ยนแปลงได้ง่ายอยู่ในปริมาณที่ต่ำ

2.3.3 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างเซลลูโลสและลิกนินต่อการสลายตัวของซากอินทรีย์

องค์ประกอบหลักภายในผนังเซลล์ (cell wall) ของพืช ประกอบด้วยลิกนิน คาร์โบไฮเดรตส 3 ชนิด คือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และเพ็คติคโพลีแซคคาไรด์ (ภาพที่ 2.8) และส่วนประกอบอื่นๆ ได้แก่ กลูแคนโพลีแซคคาไรด์ fructans และ mannans (Antongiovanni and Sargentini, 1991) ฟางข้าวมีองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญคือ เซลลูโลสและลิกนิน โดยพบว่าฟางข้าวมีปริมาณเซลลูโลสสูง เซลลูโลสเกิดจากหน่วยของ D–กลูโคส มาจับต่อกันด้วยพันธะ b–1,4’ ไกลโคซิดิก (b–1,4’ glycosidic bond) เซลลูโลสมีลักษณะเป็นโซ่ยาวมีการเชื่อมระหว่างโมเลกุลด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโซ่ของเซลลูโลส $(C_6H_{10}O_5)n$ ซึ่งเป็นพันธะที่ไม่แข็งแรงจึงส่งผลให้เซลลูโลสถูกทำลายโดยจุลินทรีย์ได้ง่าย แต่กลับพบว่าฟางข้าวมีปริมาณลิกนินต่ำ ลิกนินเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของผนังเซลล์ของพืช ลิกนินมีโมเลกุลขนาดใหญ่ (Derenne and Largeau, 2001; Bierke, 2008) เพราะเป็นสารประกอบเชิงซ้อนซึ่งมักพบอยู่รวมกับเซลลูโลส (ภาพที่ 2.9) ลิกนินเป็นสารประกอบที่มีโครงสร้างแบบวงแหวน (อะโรมาติก) ซึ่งมีคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนรวมกันเป็นหน่วยย่อยหลายชนิด ลิกนินไม่ละลายน้ำและไม่มีสมบัติทางการยืดหยุ่น นอกจากนี้ลิกนินมีการเชื่อมกับไซแลนส์ที่บริเวณผนังเซลล์พืชด้วยพันธะโควาเลนซ์ (Antongiovanni and Sargentini, 1991) เพราะฉะนั้นจึงทำให้พืชที่มีลิกนินมากมีความแข็งแรงทนทาน ลิกนินเป็นองค์ประกอบหนึ่งในสามของน้ำหนักแห้งของซากพืช โดยเฉพาะพืชชั้นสูง โดยทั่วไปลิกนินเป็นดัชนีชี้วัดความเร็วของการสลายตัวอินทรียวัตถุในดิน (Bierke, 2008) เพราะเป็นสารประกอบที่มีความทนทานต่อการสลายตัวสูงกว่าองค์ประกอบของพืชส่วนอื่นๆ ในช่วงแรกของการย่อยสลายจากจุลินทรีย์ (Glasser and Kelley, 1987; Sollins et al., 1996; Derenne and Largeau, 2001; Bierke, 2008)



ภาพที่ 2.8 โครงสร้างของเซลลูโลสในผนังเซลล์พืช
ที่มา : http://doors-sliding.com/doors-sliding-images/cellulose-structure-2.html/attachment/cellulose-structure-2 สืบค้นเมื่อ 4 มีนาคม 2555)



ภาพที่ 2.9 โครงสร้างของเซลลูโลสและลิกนินในผนังเซลล์พืช
ดัดแปลงจาก: Wyman and Yang (2009)

2.3.4 การป้องกันการสลายตัวของเซลลูโลสโดยลิกนิน

ปฏิสัมพันธ์ระหว่างลิกนินและเซลลูโลสมีอิทธิพลต่อการสลายตัวของสารอินทรีย์เป็นอย่างยิ่ง กลไกสำคัญที่ลิกนินสามารถป้องกันการสลายตัวของเซลลูโลส (labile pool) สามารถอธิบายได้ 3 กลไก ดังนี้ (Talbot et al., 2011) กลไกที่ 1 ลิกนินมีความต้านทานต่อการย่อยสลายของเอนไซม์ เนื่องจากเป็นสารประกอบที่มีโครงสร้างทางเคมีแบบอะโรมาติกโพลีเมอร์ พบในผนังเซลล์พืชชั้นสูง (Kirk and Farrell, 1987) นอกจากนี้ลิกนินเป็นองค์ประกอบของมวลชีวภาพถึงร้อยละ 15–40 ของปฐพีภาค (Berg and McClaugherty, 2003) จึงทำให้สามารถลดการสลายตัวของมวลรวม ได้เป็นอย่างมาก (Berg et al., 1993(a); Meentemeyer, 1978) กลไกที่ 2 ลิกนินอยู่ที่ผนังเซลล์ตำแหน่งระหว่าง hemicelluloses และ protein ซึ่งตำแหน่งดังกล่าวเป็นบริเวณที่ cellulose microfibrils ฝังอยู่

(Boerjan et al. 2003) ลักษณะดังกล่าวนี้ทำให้ลิกนินทำหน้าที่เปรียบเสมือนเกราะป้องกันทางกายภาพจากการเข้าย่อยสลายของพวกจุลินทรีย์ กลไกที่ 3 ลิกนินเป็นสารพอลีเมอร์ยึดเกาะด้วยพันธะโควาเลนท์ (cross link) กับเฮมิเซลลูโลสและโปรตีน (Hammel, 1997) จึงมีศักยภาพป้องกันการสลายตัวของส่วน labile จากกระบวนการ hydrolysis ในระหว่างกระบวนการสลายตัว ซึ่งเป็นกระบวนการป้องกันการสลายตัวทางเคมี

Chesson (1997) ศึกษาการสลายตัวของซากอินทรีย์ภายในกระเพาะสัตว์ซึ่งสามารถเทียบเคียงได้กับการสลายตัวของซากอินทรีย์ในดิน การสลายตัวของซากอินทรีย์ส่วนที่สลายตัวได้ง่ายเช่น โพลีแซคคาไรด์ ซึ่งไม่ถูกปกป้องจากลิกนินถูกย่อยสลายโดยเอนไซม์ภายในกระเพาะส่วนกลางของสัตว์ได้อย่างง่ายดาย แต่ในส่วนของโพลีแซคคาไรด์ที่ถูกปกป้องจากลิกนินมีการสลายตัวได้ยากดังแสดงไว้ในภาพที่ 2.10 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Mutabaruka et al. (2007) ได้ศึกษาแบบจำลองสารประกอบ (model compound) โดยใช้สารประกอบที่มีความต้านทานต่อการสลายตัวต่างกัน ได้แก่ hydrolysable และ condensed tannin ร่วมกับสารที่สลายตัวได้ง่ายได้แก่โปรตีน พบว่า condensed tannin ร่วมกับโปรตีนมีพันธะเชื่อมต่อกันได้ดีกว่า hydrolysable tannin ร่วมกับโปรตีน และมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่าอีกด้วย จากการศึกษาแบบจำลองสารประกอบ พบว่าองค์ประกอบทางเคมีของสารประกอบที่ทนทานต่อการสลายตัวสามารถปกป้องสารประกอบที่สลายตัวได้ง่ายได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับ Puttaso et al. (2011) ที่ศึกษาการสลายตัวของซากอินทรีย์ต่างคุณภาพพบว่า ซากอินทรีย์ที่มีองค์ประกอบของสารประกอบที่ทนทานต่อการสลายตัวสูงได้แก่ลิกนิน และโพลีฟีนอลส์ เช่น ใบพลวง และใบมะขาม เป็นต้น มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่าซากอินทรีย์ที่มีองค์ประกอบของสารประกอบที่ทนทานต่อการสลายตัวต่ำ เช่น ฟางข้าว เป็นต้น

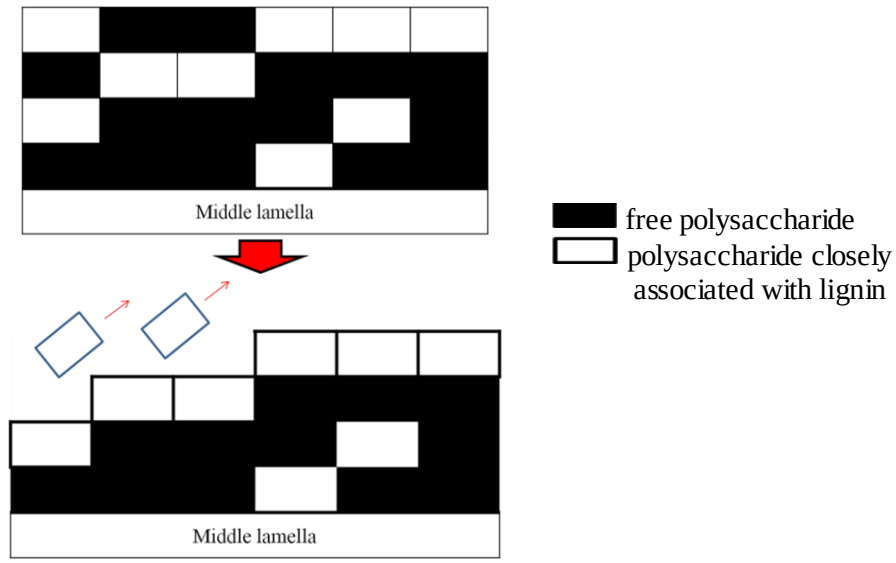
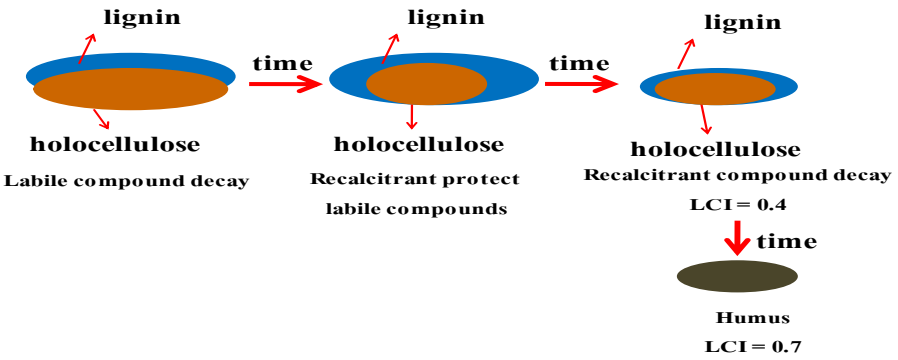


Diagram 1. A diagrammatic representation of changes at surface of lignified cell wall in cross-section undergoing microbial attack in rumen

ภาพที่ 2.10 แผนภาพภาคตัดขวางแสดงการเปลี่ยนแปลงที่บริเวณพื้นผิวของผนังเซลล์ที่มีองค์ประกอบลิกนินของกระเพาะส่วนกลางของสัตว์ซึ่งกำลังถูกจุลินทรีย์เข้าย่อยสลาย
ดัดแปลงจาก: Chesson (1997)

Herman et al. (2008) ได้ศึกษากลไกการสลายตัวของลิกนิน โดยใช้ศึกษาแบบจำลองอัตราการสลายตัวของลิกนินและเซลลูโลส โดยใช้ตัวชี้คือ Lignocellulose index (LCI index = lignin/(lignin + holocelulose); Melillo et al., 1989) ของซากอินทรีย์ที่มีการสลายตัวบนพื้นดิน โดยใช้ข้อมูลจากพื้นที่ป่าสนทางตอนเหนือของทวีปยุโรปและประเทศสหรัฐอเมริกา พบว่า LCI index ระยะแรกของการสลายตัวของสารอินทรีย์องค์ประกอบที่สลายตัวง่าย เช่น โฮโลเซลลูโลสเริ่มมีการสลายตัว เพราะโฮโลเซลลูโลสบางส่วนที่ไม่ถูกปกป้องโดยลิกนินมีการสลายตัวได้เร็ว ส่งผลให้ปริมาณโฮโลเซลลูโลสลดลง เมื่อนำไปคำนวณ LCI index จึงส่งผลให้ LCI index มีค่าสูงขึ้น เมื่อกระบวนการสลายตัวของซากอินทรีย์ผ่านไป การสลายตัวของโฮโลเซลลูโลสจะถูกป้องกันโดยองค์ประกอบของซากอินทรีย์ที่ทนทานต่อการสลายตัวเช่น ลิกนิน โดยเมื่อ LCI index = 0.4 ลิกนินเริ่มมีการสลายตัวจนกระทั่งค่า LCI index สูงกว่า 0.7 อินทรียวัตถุเริ่มเกิดเป็นฮิวมัส (ภาพที่ 2.11)



ภาพที่ 2.11 กรอบแนวคิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบลิกนินและโฮโลเซลลูโลส และการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีลิกนิน–เซลลูโลส ในระหว่างการสลายตัวของสารอินทรีย์
ดัดแปลงจาก: Herman et al. (2008)

2.3.5 การสลายตัวของลิกนินและเซลลูโลสกับการสะสมและการเก็บกักคาร์บอนในดิน

คุณภาพของสารอินทรีย์เป็นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อคาร์บอนในส่วนที่เสถียร Vityakon (2007) อ้างใน ภัทรวลัญชญ์ (2550) พบว่าคุณภาพของสารอินทรีย์มีผลต่อการสะสมสารฮิวมิกในดิน จากอัตราการสลายตัวของสารอินทรีย์มีสหสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดในทางลบกับปริมาณลิกนิน (r= -0.84) และนอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการสลายตัวของสารอินทรีย์มีสหสัมพันธ์ในทางบวกกับอัตราส่วน E_4/E_6 ของสารฮิวมิก (r=0.71) ซึ่งอัตราส่วนของ E_4/E_6 แสดงให้เห็นถึงการพัฒนาของกรดฮิวมิก โดยอัตราส่วน E_4/E_6 ที่ต่ำแสดงให้เห็นว่ามีการพัฒนาเป็นกรดฮิวมิกสูง การสลายตัวของสารอินทรีย์ภายในดินพัฒนาจนได้ส่วนที่มีความเสถียรที่สุดคือ สารฮิวมิก และถูกกักเก็บไว้ในดินและยังช่วยปรับปรุงคุณภาพของดิน เช่นการเชื่อมอนุภาคดินทำให้เกิดเม็ดดินทำให้โครงสร้างของดินดีขึ้น ช่วยลดความหนาแน่นรวมของดิน เพิ่มความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกในดิน และเป็นแหล่งของธาตุอาหารพืชในระยะยาว สารฮิวมิกประกอบด้วยกรดฮิวมิก กรดฟัลวิค และสารฮิวมิน ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีความซับซ้อนและทนทานต่อการสลายตัว สารฮิวมิกถูกสร้างหรือถูกสังเคราะห์จากสารลิกนินและโพลีฟีนอลส์ (Schnitzer, 1982)

ฟางข้าวเป็นสารอินทรีย์ที่มีปริมาณของลิกนินและโพลีฟีนอลส์ต่ำ โดย Puttaso et al., (2011) ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพของซากอินทรีย์ รูปแบบการสลายตัว และการสะสม

อินทรียวัตถุในดินทราย พบว่าการใส่ฟางข้าวไม่ส่งเสริมให้ดินมีการสะสมคาร์บอน โดยการใส่ฟางข้าวติดต่อกันเป็นระยะเวลานาน (13 ปี) มีปริมาณ SOC สะสมต่ำกว่าตำรับทดลองอื่น สอดคล้องกับ Samahadthai et al. (2010) ได้ทำการศึกษาการใช้สารอินทรีย์ต่างคุณภาพกับการสะสมคาร์บอนและการเกิดเม็ดดินในดินทรายภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยซึ่งเป็นการทดลองระยะยาว (10 ปี) เขาพบว่าฟางข้าวมีการสะสม SOC ในปริมาณที่ต่ำ (2.27 g kg^{-1}) กว่าซากอินทรีย์ชนิดอื่น เช่น ซากถั่วลิสง ใบมะขาม และใบพลวง (3.30, 3.66 และ 3.00 g kg^{-1}) และ Naklang et al. (1999) ทำการทดลองการจัดการฟางข้าว ปุ๋ยเคมี และซากใบไม้ในระบบนาข้าวในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ซึ่งมีสภาพน้ำขังและไม่ขัง รายงานว่าในช่วงแรก (1994) ของการไถกลบตอซังส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนทั้งหมดในดิน (3.40 mg g^{-1}) สูงกว่าตำรับทดลองที่ไม่มีการไถกลบใส่ฟางข้าว (3.10 mg g^{-1}) แต่เมื่อทำการเก็บตัวอย่างในช่วงต่อมา (1996) กลับพบว่าตำรับทดลองที่มีการไถกลบตอซัง (4.44 mg g^{-1}) และไม่มีการไถกลบตอซัง (4.11mg g^{-1}) การเก็บกักคาร์บอนหรือปริมาณคาร์บอนทั้งหมดในดินไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

การสลายตัวของฟางข้าวภายใต้ภาวะที่มีออกซิเจน (ดินไร่) และภาวะที่ขาดออกซิเจน (ดินนา) ไม่ค่อยมีการสะสมคาร์บอนในดินมากนั้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากคุณสมบัติของฟางข้าวที่มีอัตราส่วนของ C/N สูง (78.4) ปริมาณเซลลูโลสสูง (507 g kg^{-1}) และมีปริมาณลิกนินต่ำ (28.7 g kg^{-1}) ลิกนินเป็นตัวปกป้องการสลายตัวของเซลลูโลส แต่ฟางข้าวมีปริมาณลิกนินต่ำ จึงส่งผลให้ฟางข้าวมีการย่อยสลายสูญเสียคาร์บอนไปหมด และไม่คงเหลือเก็บกักไว้ในดิน ทั้งนี้อาจเกิดจากการสูญเสียคาร์บอนในรูปของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดย Puttaso et al. (2011) รายงานว่าแปลงทดลองที่สับกลบซากต้นถั่วลิสงและฟางข้าวเกิดการสูญเสียคาร์บอนในรูปของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงตามด้วย แปลงทดลองที่ได้สับกลบใบพลวงและใบมะขาม

จากรายงานการวิจัยจากการทดลองระยะยาวหลายฉบับ เช่น Puttaso et al. (2011) และ Samahadthai et al. (2010) พบว่าฟางข้าวเป็นสารอินทรีย์คุณภาพต่ำ โดยการใช้ฟางข้าวเพียงอย่างเดียวไม่ส่งเสริมการกักเก็บคาร์บอนในดินทรายเท่าใดนัก แต่หากนำมาผสมกับสารอินทรีย์คุณภาพสูงส่งผลให้มีการเก็บกักคาร์บอนในดินนาเนื้อทรายให้สูงขึ้น ดังผลการทดลองของ Kaewpradit et al. (2009) ที่ได้ทำการศึกษาการผสมซากถั่วลิสงร่วมกับฟางข้าวเพื่อเพิ่มผลผลิตข้าวและการใช้ประโยชน์จากไนโตรเจนในดินนา พบว่า กรรมวิธีทดลองที่ได้รับซากถั่วลิสงร่วมกับฟางข้าวในอัตรา 1:1 (ซากถั่วลิสง 5 ตัน: ฟางข้าว 5 ตันต่อเฮกตาร์) มีปริมาณ SOM สูงที่สุด จากงานวิจัยที่กล่าวมานั้นถึงแม้ฟางข้าวจะมีการสลายตัวในสภาพที่แตกต่างกันแต่เมื่อนำฟางข้าวผสมกับสารอินทรีย์ที่มีคุณภาพสูง (มีไนโตรเจนสูง และมีลิกนินอยู่ปานกลางถึงต่ำ เช่น ซากต้นถั่วลิสง) กลับส่งเสริมการเก็บกักคาร์บอนที่สูงขึ้นทั้งสภาพดินไร่และดินนา

2.4 โครงสร้างประชากรและหน้าที่ของจุลินทรีย์ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในดินเขตร้อน

2.4.1 เชื้อรา: กลุ่มจุลินทรีย์ที่มีบทบาทสำคัญในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในดินเขตร้อน

ทั้งกลุ่มเชื้อราและแบคทีเรียเป็นกลุ่มจุลินทรีย์หลักที่ทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ในดิน จุลินทรีย์เหล่านี้สามารถย่อยสลายสารโพลีเมอร์ในซากพืชเพื่อใช้เป็นแหล่งธาตุอาหารและพลังงาน (Berg and Laskowski, 2006; Guggenberger, 2005) แบคทีเรียพวก herterotroph มีบทบาท

อย่างสำคัญในการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ที่ย่อยสลายง่าย ในขณะที่รามีบทบาทสำคัญในกระบวนการย่อยสลายช่วงหลัง ซึ่งเป็นสารประกอบที่ย่อยสลายยาก (Berg and Laskowski, 2006) ระหว่างการสลายตัวของสารอินทรีย์ในดินทั้งราและแบคทีเรียมีปฏิสัมพันธ์ทั้งที่เป็นแบบเกื้อกูลกัน (synergistic interactions) และเป็นปฏิปักษ์ต่อกัน (antagonistic interactions) ซึ่งนับเป็นปัจจัยสำคัญที่ไปควบคุมอัตราการสลายตัว ปฏิสัมพันธ์แบบเกื้อกูลกันอาจดำเนินไปโดยตลอดช่วงการย่อยสลายและอาจเป็นประโยชน์ต่อทั้งแบคทีเรียและรา ยกตัวอย่างเช่น การรายงานว่าแบคทีเรียและราแข่งขันกันในการย่อยอาหารที่มีโครงสร้างอย่างง่ายที่มีแหล่งมาจากพืช และได้ใช้ยุทธศาสตร์ที่เป็นปฏิปักษ์ต่อกัน สำหรับสารประกอบที่ต้านทานการย่อยสลาย เช่น ลิกนิน พบว่ามีการใช้ทั้งยุทธศาสตร์ที่แข่งขันกันและเอื้อประโยชน์ให้กันและกัน

เชื้อราบางกลุ่มได้แก่ white rot, brown rot และ soft rot โดยเฉพาะอย่างยิ่ง *Aspergillus* sp. (Lowe, 1992), *Phanerochaete* sp., และ *Sporotichum* sp. (Boominathan and Reddy, 1992) เป็นผู้ย่อยสลายลิกนินโดยเฉพาะ โดยมีรายงานว่าราเหล่านี้ผลิตเอนไซม์ที่ย่อยสลายลิกนินและโพลีฟีนอลส์ Lauber et al. (2008) ได้รายงานว่าโครงสร้างของประชากรรา หรืออีกนัยหนึ่งชนิดประชากรราในดินได้รับอิทธิพลจากสถานภาพทางธาตุอาหารในดิน เช่น ไนโตรเจน ฟอฟอสรัส และอัตราส่วน C/N Suzuki et al. (2009) มีความคิดเห็นว่าราเป็นตัวชี้วัดคุณภาพดินที่เหมาะสมกว่าแบคทีเรีย เพราะการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างประชากรรามีความไวกว่าแบคทีเรีย ในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงสถานภาพธาตุอาหารในดิน อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าราในดินมีบทบาทที่เป็นกุญแจสำคัญยิ่งในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในดินและการสะสม SOM การวิจัยบทบาทของราในด้านนี้ยังมีน้อยในดินทรายเขตร้อนที่ผ่านกระบวนการกำเนิดดินมาอย่างยาวนาน นอกจากนี้ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างประชากรราและกระบวนการย่อยสลายยังไม่เป็นที่เข้าใจอย่างชัดเจน จึงต้องมีการศึกษาวิจัยต่อไป เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลเชิงลึกของกลไกที่ราในดินทำการย่อยสลายสารอินทรีย์และวงจรธาตุอาหารในดิน

2.4.2 หน้าที่ของจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างคุณภาพ (Soil microbial functions in decomposition of different quality organic residues)

การศึกษาหน้าที่ของจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในดินทำได้โดยการศึกษากิจกรรม (activity) ของจุลินทรีย์เหล่านี้ การศึกษากิจกรรมจุลินทรีย์ในกระบวนการต่างๆ รวมทั้งกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในดินทำได้โดยการวัดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และการวัดเอนไซม์ที่พบจากการสลายตัวของสารอินทรีย์เป็นไปได้โดยผ่านทางจุลินทรีย์ที่สร้างและปลดปล่อยเอนไซม์ออกมานอกเซลล์ เรียกว่า extracellular enzymes หรือ exoenzymes (Stemmer et al., 1999; Schimel et al., 2005) การวัดกิจกรรมของเอนไซม์และปัจจัยที่มาควบคุมกิจกรรมดังกล่าวทำให้เข้าใจศักยภาพของดินในการมีกระบวนการเมตาโบลิซึม ซึ่งเป็นตัวชี้วัดความอุดมสมบูรณ์และคุณภาพดินที่ใช้ในการทำการเกษตรและรักษาสิ่งแวดล้อม

เอนไซม์ส่วนใหญ่จะอยู่ภายในเยื่อหุ้มเซลล์ของเซลล์ที่มีชีวิตของจุลินทรีย์ เมื่อเอนไซม์ถูกปลดปล่อยออกจากเซลล์จากการซึมออกมาหรือการที่เซลล์ถูกทำให้แตก เอนไซม์สามารถมีฤทธิ์อยู่ได้เป็นเวลานาน เนื่องจากเอนไซม์อาจทำปฏิกิริยากับอนุภาคดินเหนียวหรือสารฮิวมิก กลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของอนุภาคดินเหนียว-สารฮิวมิก-เอนไซม์ซึ่งส่วนหนึ่งของดิน (Nannipieri et al., 2002; Shaw and Burns, 2006) กิจกรรมของเอนไซม์ไม่ได้กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในดิน จะมีมาในบริเวณไรโซสเฟียร์ ในรู

ดินขนาดเล็กประเภทใหญ่ (large micropore) และในสารอินทรีย์ที่ทับถมอยู่ในดิน (Foster, 1998) เอนไซม์ภายนอกเซลล์จุลินทรีย์ของดินควบคุมอัตราการสลายตัวของสารประกอบอินทรีย์เป็นโพลีเมอร์ ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการหมุนเวียนธาตุอาหาร กล่าวสำหรับเอนไซม์ที่ควบคุมวงจรของคาร์บอนและไนโตรเจนในดิน มี 3 กลุ่มด้วยกัน (Schimel et al., 2005) คือ 1) โปรทีเอส (protease), 2) เอนไซม์ที่ย่อยสลายโพลีแซคาไรด์ (ได้แก่ เซลลูเลส [cellulase] และไซแลนเนส [xylanase]), และ 3) ฟีนอลอ็อกซิเดส (phenoloxidase) จุลินทรีย์ส่วนใหญ่สามารถสังเคราะห์โปรทีเอสได้กิจกรรมของเอนไซม์นี้มีความสำคัญในกระบวนการ N mineralization (Zaman et al., 1999) ส่วนเอนไซม์เซลลูเลสและฟีนอลอ็อกซิเดสเกี่ยวข้องกับวงจรของคาร์บอน เซลลูเลสเป็นกลุ่มหนึ่งของเอนไซม์ผลิตโดยแบคทีเรียและราชนิดต่างๆ (Bhat and Bhat, 1997; Bayer et al., 2001) เอนไซม์กลุ่มนี้มีหน้าที่ในการหมุนเวียนของคาร์บอนจากเซลลูโลส ในกลุ่มเอนไซม์เซลลูเลสมีการใช้เบตากลูโคซิเดส (β-glucocidase) มากที่สุดในการเป็นตัวชี้วัดเพื่อประเมินคุณภาพดิน เอนไซม์ตัวนี้มีความไวที่จะตอบสนองต่อการปฏิบัติจัดการทางการเกษตร มีการรายงานว่ากิจกรรมของเอนไซม์เบตากลูโคซิเดสในดินทำการเกษตรมีต่ำกว่าในดินป่า Srinivasulu and Rangasqamy (2006) รายงานว่ากิจกรรมเซลลูโลสได้รับผลกระทบจากการใส่สารกำจัดราและสารปราบศัตรูพืช ได้แก่ Tridermorph และ captan ในดินปลูกถั่วลิสง นอกจากนี้การใส่ปุ๋ยอินทรีย์จะเพิ่มกิจกรรมของเอนไซม์นี้ (Bandick and Dick, 1999; Pascual et al., 1999; Saviozzi et al., 2001) มีรายงานว่าเซลโลไบโอส (cellobiose) ซึ่งเป็นสารประกอบเซลลูโลสที่มีโซ่สั้น เพิ่มกิจกรรมของเอนไซม์เบตากลูโคซิเดส (Allison and Vitousek, 2005) เซลโลไบโอสผลิตภัณฑ์ครึ่งทางของการย่อยสลายเซลลูโลสนั่นเอง ผลนี้แสดงให้เห็นถึงความจำเพาะของเอนไซม์เบตากลูโคซิเดสต่ออาหาร (substrate)

อินเวอร์เตส (invertase) เป็นเอนไซม์ที่ย่อยสลายสารประกอบคาร์บอนที่ย่อยสลายง่าย เอนไซม์นี้ไปทำการเร่งปฏิกิริยา (catalyse) ไฮโดรไลซิสน้ำตาลซูโครสให้เปลี่ยนเป็นกลูโคสและฟรุกโตส (Frankenberger and Johansson,1983; Ross,1983) ส่วนเอนไซม์ไซแลนเนส (xylanase) ทำการย่อยสลายองค์ประกอบไซแลนของเฮมิเซลลูโลสในซากพืชให้เปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบคาร์โบไฮเดรตอื่นๆ จึงนับเป็นตัวชี้วัดการสูญเสียอินทรียวัตถุได้ดี (Rodriguez-Kabana, 1982; Sinsabaugh, 1994) ทั้งอินเวอร์เตสและไซแลนเนสได้รับอิทธิพลจากองค์ประกอบทางเคมีของสารอินทรีย์ในช่วงการสลายตัว Stemmer et al. (1999) รายงานว่ากิจกรรมของอินเวอร์เตสสูงสุดที่ 4 สัปดาห์หลังใส่ซากต้นข้าวโพด แต่เอนไซม์ไซแลนเนสยังคงมีกิจกรรมต่อเนื่องไปถึง 4-16 สัปดาห์หลังจากใส่ซากลงดิน

เอนไซม์ที่ย่อยสลายลิกนินและโพลีฟีนอลส์ (lignolytic enzymes) มีความสำคัญในการหมุนเวียนของคาร์บอนและไนโตรเจนในดินเช่นกัน เพราะลิกนินและแทนนินเชื่อมหรือยึดอยู่กับโพลีแซคคาไรด์และโปรตีน ตามลำดับ (Gamble et al., 1996; Schimel et al., 2005) เอนไซม์ในกลุ่มลิกโนไลติกได้แก่ เปอร์อ็อกซิเดส (peroxidase) (แมงกานีส และลิกนิน-เปอร์อ็อกซิเดส)และ ฟีนอลอ็อกซิเดส (แล็กเคส [laccase]) เป็นเอนไซม์ 3 ตัวหลักที่ย่อยสลายสารประกอบลิกนินและโพลีฟีนอลส์ในซากพืช เอนไซม์ในกลุ่มลิกโนไลติกมีความไวต่อปริมาณไนโตรเจนในซากอินทรีย์ Fog (1988) และ Berg and Matzner (1997) เน้นว่าการย่อยสลายลิกนินเกิดในช่วงหลังของกระบวนการย่อยสลาย และถูกจำกัดโดยปริมาณไนโตรเจนในซาก