บทที่ 2

สอบสวนเอกสาร

2.1 ความสำคัญของฟอสฟอรัส

ฟอสฟอรัส เป็นธาตุอาหารหลักของพืชธาตุหนึ่งในจำนวน 3 ธาตุ (ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โปตัสเซี่ยม) ที่พืชต้องการเป็นจำนวนมาก ปริมาณที่พบในพืชอยู่ในอันดับที่ 8 เรียงจาก ไฮโดรเจน คาร์บอน ออกซิเจน ไนโตรเจน โปตัสเซียม แคลเซี่ยม และแมกนีเซียม พืชได้ฟอสฟอรัสมาจากดิน (มีส่วนน้อยที่ติดมากับเมล็ด) ฟอสฟอรัสในพืชและในดินเป็นสารประกอบออร์โทฟอสเฟต ($H_2PO_4^-$, HPO_4^{-2}, PO_4^{3-}) เฉพาะในพืชประมาณร้อยละ 33 - 67 ของฟอสฟอรัสทั้งหมดอยู่ในรูปอิออนฟอสเฟต (PO_4^{3-}) สารที่เหลือเป็นอินทรีย์ฟอสเฟต (Organic phosphate) อิสระอยู่ในน้ำซึ่งอยู่ในทางลำเลียงน้ำ (xylem) และอยู่ในน้ำในเซลล์ของพืช โดยทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมระดับความเป็นกรดด่างภายในพืชให้คงที่ ขณะเดียวกันก็เป็นวัตถุดิบของขบวนการสร้างสารต่าง ๆ โดยเฉพาะสารที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายทอดพลังงานในพืช (สมบุญ เตชะภิญญาวัฒน์, 2536)

ฟอสฟอรัสมีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตเป็นอย่างยิ่ง เพราะฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบของกรดนิวคลีอิก นิวคลีโอโปรตีน ซึ่งเกี่ยวข้องกับการปฏิบัติหน้าที่ของเซลล์ การสร้างองค์ประกอบต่าง ๆ ของเซลล์ การแบ่งเซลล์ และการสืบพันธุ์ และยิ่งกว่านั้นฟอสฟอรัสยังเป็นองค์ประกอบที่จำเป็นของสารประกอบฟอสฟอรัส ที่ทำหน้าที่รับช่วงถ่ายทอดพลังงานระหว่างสารต่าง ๆ ของระบบต่าง ๆ คือ ATP เช่น ระบบการสังเคราะห์แสงในพืช ระบบการหายใจ เป็นต้น นอกจากนี้ในขบวนการเพื่อการดำรงชีพ การเจริญเติบโต การสร้างสาร การขนย้ายสารล้วนต้องใช้พลังงานทั้งสิ้น ด้วยเหตุเหล่านี้ฟอสฟอรัสจึงเกี่ยวข้องกับการสร้างเสริมการเจริญเติบโตความแข็งแรงของพืช ทั้งส่วนที่อยู่เหนือดินและราก ตลอดจนการออกดอกออกผล (Giese, 1973)

2.2 ฟอสฟอรัสในดิน : รูปและการเปลี่ยนแปลงรูปของฟอสฟอรัสในดิน

ฟอสฟอรัสเป็นสารอาหารที่มีการหมุนเวียนในลักษณะที่ไม่เป็นไอระเหย ดังนั้นในส่วนของระบบนิเวศที่อยู่เหนือดิน วงจรของฟอสฟอรัสเหมือนสารอาหารตัวอื่น ส่วนที่เก็บสะสมที่

สำคัญที่สุดเหนือดิน ก็คือ มวลชีวภาพที่เป็นใบ ซึ่งสำคัญมากกว่าส่วนเนื้อไม้ ดังนั้นถ้ามีการผลัดใบก็ดูเหมือนว่าฟอสฟอรัสในมวลชีวภาพจะลดลงเป็นอย่างมาก แต่เนื่องจากฟอสฟอรัสเป็นสารอาหารที่มีความจำเป็นมาก และมีปริมาณจำกัดในระบบนิเวศเขตร้อน จึงมีกลไกแก้ไข คือ ก่อนที่จะมีการผลัดใบจะมีการเคลื่อนย้ายฟอสฟอรัสจากใบเข้าสู่ลำต้น ฟอสฟอรัสที่นำเข้าสู่ระบบทางอากาศมีน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับสารอาหารตัวอื่น (Jordan, 1985)

รูปแบบของฟอสฟอรัสในระบบนิเวศบนบก ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในดินนั้น มี 4 รูปแบบ คือ

1. ฟอสฟอรัสที่สกัดด้วยกรดเจือจาง (Acid extractable phosphorus) คือ ฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำได้ และพืชสามารถนำไปใช้ได้ทันที (Available phosphorus)

2. ฟอสฟอรัสภายนอก (Non-occluded phosphorus) คือฟอสฟอรัสที่ถูกจับอยู่ที่ผิวของออกไซด์หรือไฮดรัสออกไซด์ของเหล็กและอลูมินั่ม หรือบนอนุภาคดิน

3. ฟอสฟอรัสภายใน (Occluded phosphorus) คือฟอสฟอรัสที่ถูกจับอยู่ภายในโครงสร้างของอนุภาคดิน หรือภายในโครงสร้างที่ประกอบด้วยออกไซด์ของเหล็กและอลูมินั่ม

4. ฟอสฟอรัสอินทรีย์ (Organic phosphorus) คือฟอสฟอรัสที่จับอยู่กับอินทรีย์สาร หรือถูกห่อหุ้มอยู่ภายในโครงสร้างของอินทรีย์สาร

ฟอสฟอรัสทั้ง 4 รูปแบบ จะมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นในดินดังนี้ คือ ระหว่างการผุพังสลายตัว (Weathering) ของดินจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของฟอสฟอรัสทั้ง 4 ถ้ามีการผุพังสลายตัวสูงมาก ๆ ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของฟอสฟอรัสภายใน ซึ่งพืชไม่สามารถนำไปใช้ได้ ดังนั้นในเขตร้อนซึ่งมีการผุพังสลายตัวสูงกว่าในเขตอบอุ่นและเขตหนาว จึงมีผลทำให้ฟอสฟอรัสที่พืชสามารถจะนำไปใช้ประโยชน์ได้น้อยกว่าแม้ว่าดินจะเกิดจากวัตถุต้นกำเนิดดินเดียวกัน (Jordan, 1985)

ดินในเขตร้อนจะมีความสามารถในการตรึงฟอสฟอรัส (Phosphorus fixation) สูงมากทำให้ฟอสฟอรัสที่พืชสามารถจะนำไปใช้ประโยชน์ได้มีน้อย กลายเป็นปัญหาที่สำคัญมากที่สุด

ปัจจัยที่มีผลต่อการตรึงของฟอสฟอรัส คือ

1. เวลาในการชะล้างภายในดิน (leaching) เมื่อเกิดการชะล้างภายในผลสุดท้ายคือประจุบวกต่าง ๆ ถูกชะล้างไป มีไฮโดรเจนอิออน (H^+) และ อลูมินั่มอิออน (Al^{+3})

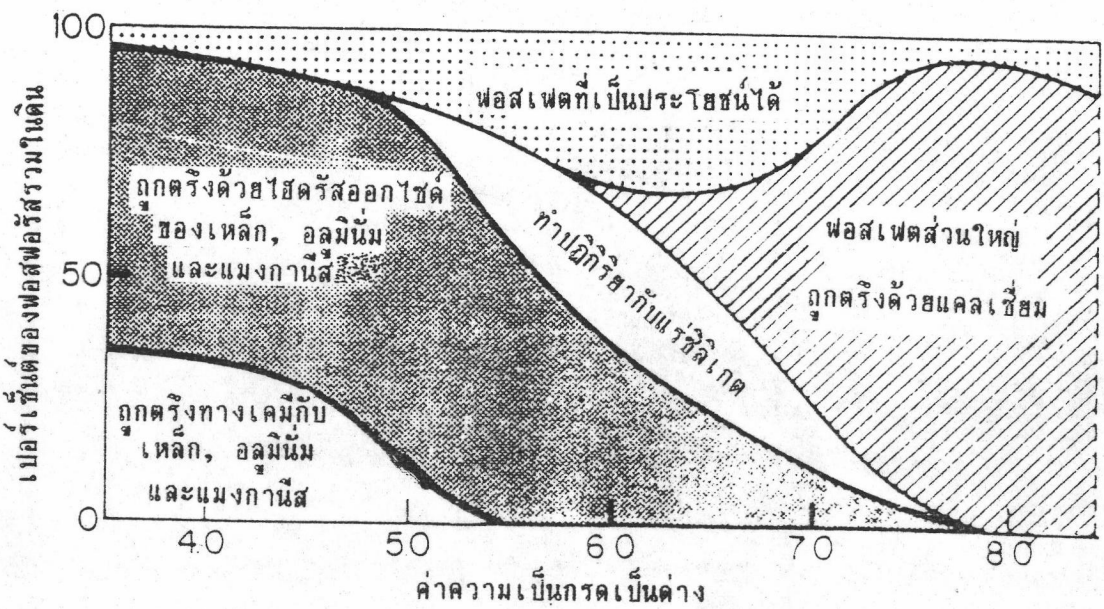
แทนที่ฟอสฟอรัสรูปที่เป็นประโยชน์จะถูกตรึงโดยเหล็กและอลูมินั่มออกไซด์สูงขึ้นตามเวลา (Bolan และคณะ1985)

2. อุณหภูมิที่มีผลโดยตรงต่ออัตราการชะล้างภายในดิน ดังนั้นในเขตร้อนจึงมีการชะล้างภายในดินสูงกว่าเขตอบอุ่น

3. ความชื้นและน้ำในดิน มีผลโดยตรงต่ออัตราการชะล้าง

4. ความเป็นกรดเป็นด่าง

ระหว่างการผุพังสลายตัว ธาตุอาหารประจุบวกต่าง ๆ จะถูกแทนที่ด้วยไฮโดรเจนหรืออลูมินั่ม มีผลทำให้ความเป็นกรดของดินเพิ่มสูงขึ้น (Fox and Gillman, 1981) ซึ่งเป็นตัวการสำคัญที่มีผลต่อปฏิกิริยาระหว่างฟอสฟอรัสกับเหล็ก อลูมินั่ม แมงกานีส และแคลเซี่ยม ดังกราฟที่ 1 ซึ่งแสดงปฏิกิริยาของฟอสฟอรัสในสภาวะความเป็นกรดเป็นด่างต่างกัน คือ



ภาพที่ 1 กราฟแสดงสัดส่วนของการตรึงฟอสฟอรัสในสภาวะความเป็นกรดเป็นด่างระดับต่าง ๆ

ที่มา : ดัดแปลงจาก Brady (1984)

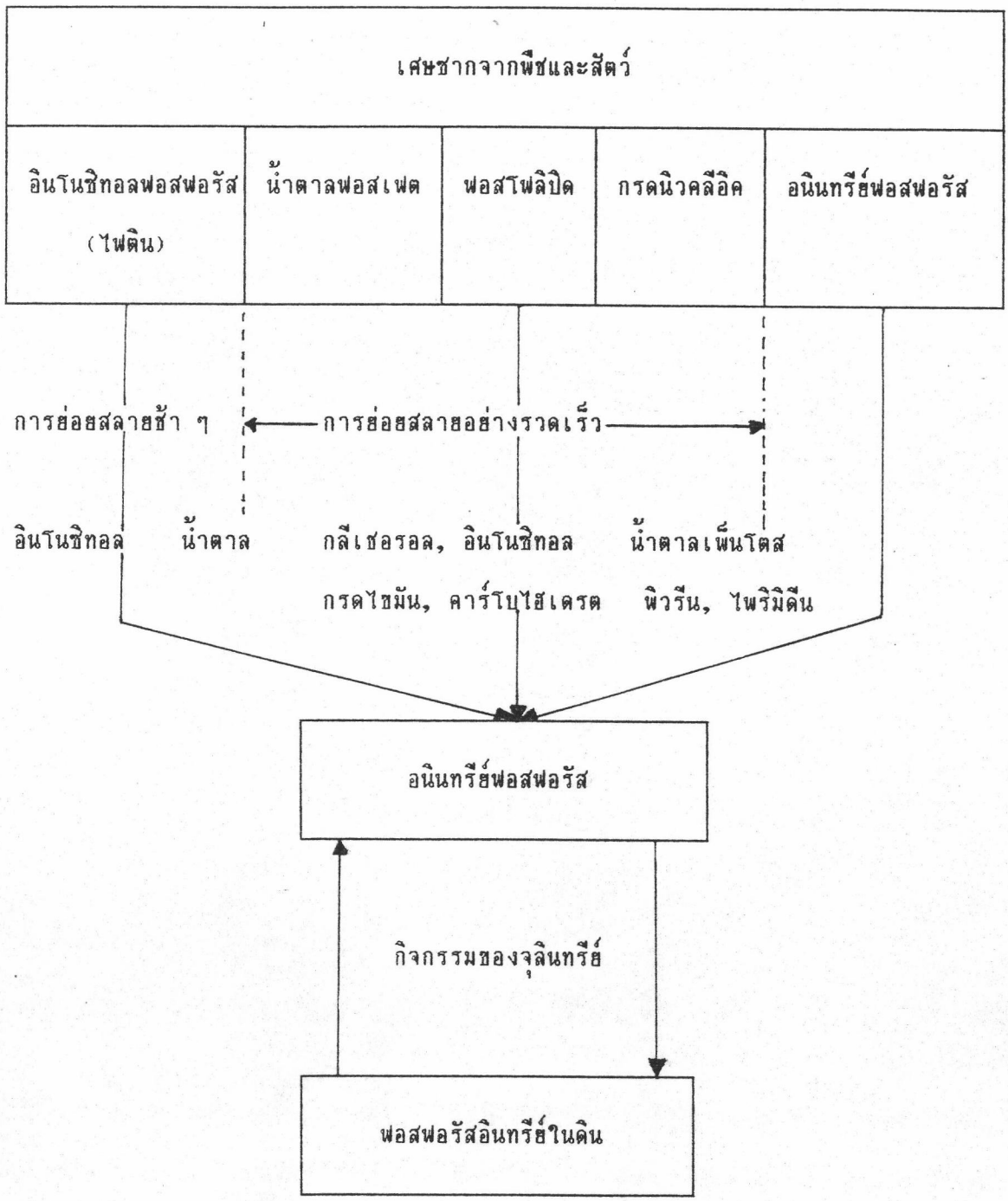
ถ้า pH ต่ำ ฟอสฟอรัสจะทำปฏิกิริยาเป็นสารประกอบฟอสเฟตกับเหล็ก อลูมินั่ม และแมงกานีส ซึ่งเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำ สลายตัวได้ยาก และพืชไม่สามารถจะนำไปใช้ประโยชน์ได้ ซึ่งเป็นต้นเหตุที่สำคัญที่สุดของปัญหาการขาดแคลนฟอสฟอรัสในเขตร้อน เพราะดินในเขตร้อนโดยทั่วไปมักจะเป็นกรด

ถ้า pH สูง ดินเป็นด่าง เช่น มีแคลเซียมมาก ๆ ฟอสฟอรัสจะทำปฏิกิริยากลายเป็นแคลเซียมฟอสเฟต ซึ่งพืชไม่สามารถจะนำไปใช้ประโยชน์ได้

ดังนั้นฟอสฟอรัสจะอยู่ในรูปที่ละลายน้ำและพืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ จะต้องเป็นสภาวะที่ดินมี pH เป็นกลาง ค่อนไปทางกรดเล็กน้อย ระหว่าง 5.5 - 7

นอกจากปัจจัยที่มีผลต่อการจับของฟอสฟอรัสดังกล่าวแล้วในดินเขตร้อนชื้นยังมีการผุพังทางเคมี (chemical weathering) สูง ในขณะเกิดการชะล้างผุพังของแร่ธาตุในดินประจุบวกต่าง ๆ จะถูกน้ำชะล้างไปและแทนที่ด้วยไฮโดรเจนอิออนและอลูมินั่มอิออนเมื่อ pH ต่ำกว่า 4.8 ซึ่งมีความสามารถในการแทนที่ (replacing power) สูงกว่าประจุบวกอื่น ทำให้ในสารละลายดินมีปริมาณของ H^+ สูง pH ในดินจึงต่ำ ในกรณีของอลูมินั่มอิออนถ้ามีในปริมาณมากทำให้รากพืชไม่สามารถดูดสารอาหารอื่นได้ (Hue และคณะ 1986)

ดังกล่าวมาแล้ว ฟอสฟอรัส มีวงจรที่ไม่เป็นไอระเหยและประกอบกับดินในเขตร้อนมีการชะล้างผุพังสูง ทำให้ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ส่วนใหญ่ถูกตรึงไว้ด้วยอลูมินั่ม ฟอสฟอรัสที่นำเข้ามาในระบบส่วนใหญ่มาจากเศษซากใบไม้ซากสัตว์ที่ทับถมลงไปในดิน และมีการเปลี่ยนแปลงของฟอสฟอรัสในดินโดยอาศัยกระบวนการย่อยสลาย (Decomposition) เป็นหลัก ดังแผนภูมิ



ภาพที่ 2 การเปลี่ยนแปลงของฟอสฟอรัสในดิน

ที่มา : ดัดแปลงจาก Stevenson (1986)

ดังนั้นปัจจัยที่อาจจะมีอิทธิพลต่อความสามารถในความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัส คือ อินทรีย์วัตถุบนผิวของอนุภาคดิน การเปลี่ยนรูปของอินทรีย์ฟอสฟอรัสให้อยู่ในรูปอนินทรีย์ฟอสฟอรัส เนื่องจากการทำงานของเอนไซม์ที่ผลิตจากจุลินทรีย์ดิน (McGill และ Cole, 1981) นั่นคือ เป็นผลจากการย่อยสลายเศษซากนั่นเอง

2.3 อิทธิพลของการย่อยสลายเศษซากใบไม้ต่อการเปลี่ยนแปลงของฟอสฟอรัสในดิน

2.3.1 การย่อยสลายเศษซากใบไม้

เมื่อเศษซากใบไม้ (litter) ร่วงหล่นลงสู่พื้นดิน กระบวนการย่อยสลายก็จะเริ่มเกิดขึ้นซึ่งเป็นกระบวนการที่ซับซ้อน กระบวนการย่อยสลายมีการให้นิยามกันอย่างกว้างขวาง โดยสรุปคือ กระบวนการที่มีการลดลงของมวลของสารตั้งต้นหรืออินทรีย์วัตถุนั่นเอง (Swift และ Heal, 1979; Dickinson และคณะ 1974) การลดลงของมวลหรือการสูญหายของมวล เป็นผลมาจาก

2.3.1.1 กระบวนการที่เกิดขึ้นในกระบวนการย่อยสลาย

กระบวนการย่อยสลายมักประกอบด้วย 3 กระบวนการย่อย ซึ่งนำไปสู่การสูญหายของมวลของอินทรีย์วัตถุ กระบวนการเหล่านี้ได้แก่ (Webb, 1977; Witkamp, 1971; Jonathan and Flanagan, 1989)

ก. กระบวนการทำให้หักเป็นชิ้นเล็กชิ้นน้อยของเศษซากใบไม้ทางกายภาพ (Comminution) เนื่องจากการกระทำของสัตว์ในดินขนาดกลาง และการกระทำที่เกิดจากสิ่งไม่มีชีวิต เช่น การสึกกร่อนของเศษซากใบไม้จากการกระทำของลมและฝน กระบวนการนี้ทำให้มีการเพิ่มพื้นที่ผิวของสารตั้งต้นคือเศษซากอินทรีย์ ทำให้มีการเพิ่มการชะล้างและเพิ่มอัตราการเกิดออกซิเดชั่นขึ้น

ข. กระบวนการสลายที่เกิดจากการกระทำของเอนไซม์ของพวกจุลินทรีย์ดิน โดยเอนไซม์นี้จะเปลี่ยนอินทรีย์สารให้เป็นอนินทรีย์สาร ซึ่งจะเป็นแร่ธาตุอาหารต่อไป

ค. กระบวนการชะล้าง เป็นกระบวนการทางกายภาพ โดยน้ำจะละลายอินทรีย์สารให้สูญเสียออกไปจากระบบ

กระบวนการเหล่านี้อาจจะเกิดขึ้นพร้อม ๆ กัน หรือเกิดต่างเวลากัน ถ้าหากเกิดต่างเวลากันลำดับการเกิดขึ้นจะควบคุมโดยคุณภาพของเศษซากใบไม้และปัจจัยทางสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งสัมพันธ์กับปัจจัยทางกายภาพของดิน เช่น เศษซากใบไม้ซึ่งส่วนใหญ่ประกอบด้วยเนื้อเยื่อที่ไม่แข็งมาก เชื่อว่าเกิดจากการทำของจุลินทรีย์อย่างเดียว หรือเกิดจากกระบวนการแยกสลายสาร ขณะมีการเพิ่มอินทรีย์วัตถุให้กับดิน เศษซากใบไม้ส่วนใหญ่ประกอบด้วยเนื้อเยื่อที่สลายได้ยาก โดยเริ่มตั้งแต่กระบวนการแตกเป็นชิ้นเล็กชิ้นน้อยก่อนแล้วตามด้วยกระบวนการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากการกระทำของเอนไซม์จากจุลินทรีย์ และกระบวนการชะล้าง ตามลำดับ ซึ่ง Swift (1979) สรุปว่า เศษซากใบไม้ที่มีคุณภาพสูง (แร่ธาตุอาหารสูง ลิกนินต่ำ) ย่อยสลายเน่าเปื่อยและปลดปล่อยธาตุอาหารได้เร็วกว่าเศษซากใบไม้ที่มีคุณค่าต่ำ (แร่ธาตุอาหารต่ำ ลิกนินสูง) แต่เศษซากใบไม้ที่มีคุณภาพต่ำสามารถจะป้องกันการชะล้างจนกว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นแร่ธาตุอาหาร ในบางกรณีกระบวนการชะล้าง (leaching) มักจะเกิดก่อนขบวนการอื่น ๆ Heynes (1986) ได้ตรวจสอบเอกสารวิจัยและจากการสังเกต ซึ่งแสดงให้เห็นว่าน้ำหนักที่หายไปและการปลดปล่อยแร่ธาตุอาหารตลอดช่วงแรกที่เศษซากใบไม้ร่วงหล่น ไม่ได้เป็นสาเหตุที่มาจากกระทำของจุลินทรีย์ แต่มาจากการชะล้างสารละลายจากเศษซากใบไม้มากกว่า ตัวอย่างเช่น การละลายน้ำของสารประกอบไนโตรเจนซึ่งแสดงให้เห็นถึงการชะล้างอย่างง่ายจากเนื้อเยื่อพืชในช่วงเวลาสั้น ๆ ด้วยน้ำกลั่น Mason (1977) ยังรายงานเพิ่มเติมอีกว่าน้ำหนักและแร่ธาตุอาหารที่หายไปด้วยการชะล้างที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเดือนแรกที่เศษซากใบไม้ตกสู่พื้น

โดยทั่วไปขั้นตอนแรกของการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุ จะเริ่มต้นกระบวนการย่อยสลายอันดับแรกโดยสัตว์กินซาก เช่น ตัวอ่อนของแมลงปีกแข็ง ตะขาบ กิ้งกือ แมลงหางดีด ไรดิน และปลวกในดินเขตร้อน ที่ทำให้เกิดการแตกหักทางกายภาพของเศษซากใบไม้ เป็นการเพิ่มพื้นที่ และรอยแตกแยกตามผิวของเศษซากใบไม้ โดยเฉพาะส่วนที่เป็นผิวใบ เพื่อเตรียมให้จุลินทรีย์ดินได้ทำงานต่อไป (Witkamp, 1966; Kimmins, 1987) ต่อมาผู้ย่อยสลาย เช่น รา โปรโตซัว แบคทีเรีย ซึ่งทำงานโดยปลดปล่อยเอนไซม์ภายในเซลล์ออกไปทำให้เกิดการย่อยสลายของเนื้อเยื่อป้องกันชั้นนอกของเศษซากใบไม้ซึ่งทำให้ได้สารอินทรีย์ โดยการทำงานของผู้ย่อยสลาย ซึ่งส่วนใหญ่เป็นพวกจุลินทรีย์ดิน (Ross, 1989) ซึ่งขั้นตอนนี้เป็น

การทำงานมีประสิทธิภาพสูงของจุลินทรีย์ดิน ทำให้เกิดการสูญเสียเซลลูโลสและลิกนินอย่างรวดเร็ว และมีสัตว์ในดินพวกไรดินและแมลงหางดีดเป็นตัวร่วมในการทำงาน ซึ่งเป็นการทำลายชั้นเนื้อเยื่อกลุ่มเซลล์ที่มีสีเขียวระหว่างผิวใบด้านบนและด้านล่างของใบ ตลอดจนเส้นใบ ผิวใบ และขอบใบหายไป ซึ่งกิจกรรมาจากสัตว์ในดินกลุ่มนี้ทำให้เพิ่มสารสีคล้ำจากมูลของสัตว์ในดิน ซึ่ง Coleman และคณะ (1990) พบว่าขณะที่มีความหนาแน่นของสัตว์ขาข้อที่มีขนาดเล็กในดินสูงที่สำคัญได้แก่ แมลงหางดีด และไรดิน จะนำไปสู่การเพิ่มอัตราการย่อยสลายและทำให้อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนและไนโตรเจน (C : N ratio) ต่ำ ในขั้นตอนนี้กากของเศษซากใบไม้มักมีสีคล้ำ นิ่ม และแตกหักง่าย (Burges, 1967) ซึ่งเนื้อเยื่อที่ตายแล้วจากมวลชีวภาพ (ซากและมูล) ของสัตว์ในดินนำไปสู่ลำดับถัดไปของการย่อยสลาย

2.3.1.2 <u>การปลดปล่อยแร่ธาตุตลอดช่วงการย่อยสลาย</u>

การย่อยสลายเศษซากใบไม้และการปลดปล่อยแร่ธาตุอาหารเป็นจุดเชื่อมโยงของวงจรชีวธรณีเคมีที่สำคัญในระบบนิเวศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งแล้วระบบนิเวศในเขตร้อน ซึ่งแร่ธาตุส่วนใหญ่อยู่ในมวลชีวภาพในขณะที่เขตอบอุ่นแร่ธาตุส่วนใหญ่อยู่ในดิน (Odum, 1983) เพราะฉะนั้นกระบวนการย่อยสลายจึงเป็นกุญแจสำคัญในระบบนิเวศเขตร้อนที่นำไปสู่การปลดปล่อยแร่ธาตุอาหารสู่ดิน ถ้าการย่อยสลายช้าเกินไป แร่ธาตุส่วนใหญ่ยังถูกสะสมอยู่ในรูปของมวลชีวภาพและมีการหมุนเวียนได้ช้า ย่อมมีผลต่อการลดลงของผลผลิตของระบบนิเวศ (Kimmins, 1987) แร่ธาตุในเศษซากใบไม้สามารถปลดปล่อย โดยกลไกหลัก 2 กลไกคือ การชะล้างเป็นกลไกทางธรรมชาติที่เป็นทางด้านกายภาพและการย่อยสลายเป็นกลไกทางธรรมชาติที่เกี่ยวข้องกับทางชีวเคมี (Gosz et al, 1973) การสูญเสียแร่ธาตุอาหารตอนแรกส่วนใหญ่เป็นผลจากการชะล้าง หลังจากนั้นจะเกิดการย่อยสลายเกิดขึ้น ซึ่งเป็นกลไกหลักในการปลดปล่อยแร่ธาตุอาหาร

การชะล้างเป็นกลไกทางกายภาพ ที่ทำให้เกิดการไหลซึมของน้ำออกจากสารละลายในโมเลกุลและอินทรีย์สารจากเศษซากใบไม้ การศึกษาถึงน้ำหนักและแร่ธาตุอาหารที่หายไปจากเศษซากใบไม้เนื่องจากการชะล้างแสดงให้เห็นว่า โซเดียม 76%

โปตัสเซี่ยม 70% แมกนีเซียม 65% ถูกชะล้างออกจากเศษซากใบไม้ในช่วงเดือนแรก (Mason และ Bryant, 1975)

กระบวนการเปลี่ยนแปลงแร่ธาตุอาหารจากรูปที่เป็นอินทรีย์สารให้เป็นรูปอนินทรีย์สารกลายเป็นแร่ธาตุที่เป็นประโยชน์ต่อพืชต่อไป (Mineralization) เป็นกระบวนการทางชีวเคมีที่เกิดขึ้นขณะเกิดการย่อยสลาย กระบวนการดังกล่าวยังรวมไปถึงสารประกอบอินทรีย์ หรือแร่ธาตุที่จับอยู่กับสารอินทรีย์ ที่สามารถเปลี่ยนรูปเป็นอนินทรีย์สารได้ แร่ธาตุที่ออกมาผ่านกระบวนการโดยสัตว์ในดิน หรือการสูญหายโดยหลาย ๆ กลไก เช่น การชะล้าง การระเหย (Volatile) หรือถูกตรึง (fix) โดยคอลลอยด์ของดิน แร่ธาตุอาหารที่ปลดปล่อยจากกระบวนการเปลี่ยนแปลงแร่ธาตุอาหารจากรูปอินทรีย์สารให้เป็นอนินทรีย์สาร คือ คาร์บอน ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และซัลเฟอร์ ถึงแม้ว่ากระบวนการดังกล่าวทำให้มวลของเศษซากใบไม้หายไปเกิดแร่ธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อพืช แต่การเปลี่ยนแปลงเป็นแร่ธาตุส่วนใหญ่ยังต้องมีจุลินทรีย์ในดินเป็นตัวกลางดึงไปใช้ก่อนที่พืชนั้นจะใช้ได้ต่อไป

กระบวนการเปลี่ยนแปลงแร่ธาตุอาหารจากรูปอินทรีย์สารให้เป็นรูปอนินทรีย์สาร และกระบวนการเปลี่ยนแปลงแร่ธาตุในรูปที่หมุนเวียนได้เป็นรูปที่อยู่กับที่ (Immobilization) เกิดขึ้นในเวลาเดียวกัน ในทิศทางตรงกันข้ามกัน ความแตกต่างของทั้ง 2 กระบวนการเป็นผลสุทธิกัน แต่อย่างไรก็ตามผลสุทธิของกระบวนการเปลี่ยนแปลงแร่ธาตุอาหารจากรูปอินทรีย์สารให้เป็นรูปอนินทรีย์สารมักจะเด่นกว่า เนื่องจากมีกิจกรรมพื้นฐานของสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กในดินที่ไม่สามารถสร้างอาหารได้ เป็นตัวการทำให้หมดเปลืองของพลังงานของสารอินทรีย์ (Jasson and Person, 1982) ส่วนผลสุทธิของกระบวนการเปลี่ยนแปลงแร่ธาตุที่หมุนเวียนได้เป็นรูปที่อยู่กับที่มักเกิดขึ้นตอนเริ่มต้นของกระบวนการย่อยสลาย ซึ่งจะมีกระบวนการเปลี่ยนแปลงแร่ธาตุอาหารจากรูปอินทรีย์สารให้เป็นรูปอนินทรีย์สารตามมาช่วงหลัง อัตราส่วนของคาร์บอนในการเป็นธาตุอาหารที่เป็นอินทรีย์สารบ่งชี้ว่า กระบวนการใดจะเกิดขึ้นก่อนหลังระหว่างผลสุทธิของกระบวนการเปลี่ยนแปลงแร่ธาตุที่หมุนเวียนได้เป็นรูปที่อยู่กับที่ ตัวอย่างเช่น ผลสุทธิของกระบวนการเปลี่ยนแปลงแร่ธาตุในรูปที่หมุนเวียนได้เป็นรูปที่อยู่กับที่ของไนโตรเจนในเศษซากใบไม้จะเกิดภายหลังที่กระบวนการเปลี่ยนแปลงแร่ธาตุอาหารจากรูปอินทรีย์สารให้เป็นรูปอนินทรีย์สารเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ นั่นเป็นเพราะในช่วงที่เกิดการย่อยสลายอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อ

ไนโตรเจนจะลดลงเรื่อย ๆ และบางครั้งปริมาณไนโตรเจนจะถูกจำกัดด้วยการเจริญเติบโตและกิจกรรมของจุลินทรีย์ในช่วงที่ไม่ยาวนานนัก นั่นถือเป็นจุดวิกฤติที่จะเปลี่ยนจากกระบวนการเปลี่ยนแปลงแร่ธาตุในรูปที่หมุนเวียนได้เป็นรูปที่อยู่กับที่นำไปสู่กระบวนการเปลี่ยนแปลงแร่ธาตุอาหารจากรูปอินทรีย์สารให้เป็นรูปอนินทรีย์สาร (Haynes, 1986) ความผันแปรของคาร์บอนที่จะเป็นแร่ธาตุอาหารซึ่งจะถูกปลดปล่อยออกมาในรูปของสารอินทรีย์ที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากไนโตรเจน ฟอสฟอรัส ที่เกิดขึ้นในสารประกอบอินทรีย์ที่ต่างกัน และรูปของอินทรีย์สารที่ต่างกัน

อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน ของสารประกอบอินทรีย์จะเป็นตัวบ่งชี้ว่าเป็นการเริ่มต้นของกระบวนการเปลี่ยนแปลงแร่ธาตุอาหารจากรูปอินทรีย์สารให้เป็นอนินทรีย์สาร หรือกระบวนการเปลี่ยนแปลงแร่ธาตุที่หมุนเวียนได้เป็นรูปที่อยู่กับที่ดังนี้คือ ขณะเริ่มต้นเกิดกระบวนการเปลี่ยนแปลงแร่ธาตุอาหารจากรูปอินทรีย์สารให้เป็นอนินทรีย์สารอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนและไนโตรเจนจะน้อยกว่า 20 : 1 อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนและฟอสฟอรัสจะน้อยกว่า 200 : 1 ขณะที่เริ่มต้นเกิดกระบวนการเปลี่ยนแปลงแร่ธาตุในรูปที่หมุนเวียนได้เป็นรูปที่อยู่กับที่ อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนและไนโตรเจนเป็น 30 : 1 อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนและฟอสฟอรัสมากกว่า 300 : 1 อัตราส่วนของคาร์บอนและซัลเฟอร์มากกว่า 400 : 1 (Stevenson, 1986)

แร่ธาตุอาหารที่ผ่านกระบวนการเปลี่ยนแปลงแล้วส่วนใหญ่จะถูดดูดซับไว้ด้วยมวลชีวภาพของจุลินทรีย์ ซึ่งเป็นตัวที่ทำให้การหมุนเวียนแร่ธาตุอาหารเกิดได้เร็วขึ้น ตัวอย่างเช่น จากการศึกษาการเกิดกระบวนการเปลี่ยนแปลงแร่ธาตุอาหารจากรูปอินทรีย์สารให้เปลี่ยนเป็นรูปอนินทรีย์สาร ชี้ให้เห็นว่าการหมุนเวียนของไนโตรเจนจากเซลของจุลินทรีย์ที่ตายแล้วสูงกว่า 5 เท่าของอินทรีย์ไนโตรเจนในดินธรรมชาติ (Stevenson, 1986) ดังนั้นแร่ธาตุอาหารที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากมวลชีวภาพของจุลินทรีย์จะเป็นตัวส่งเสริม ปริมาณแร่ธาตุอาหารให้เป็นแหล่งแร่ธาตุอาหารในดินที่เป็นประโยชน์ต่อพืชให้สูงขึ้น

ปริมาณของธาตุอาหาร ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส ในมวลชีวภาพของจุลินทรีย์ในดินพบว่าปริมาณไนโตรเจนรวม 0.5 - 15.5% (Anderson และ Domsch

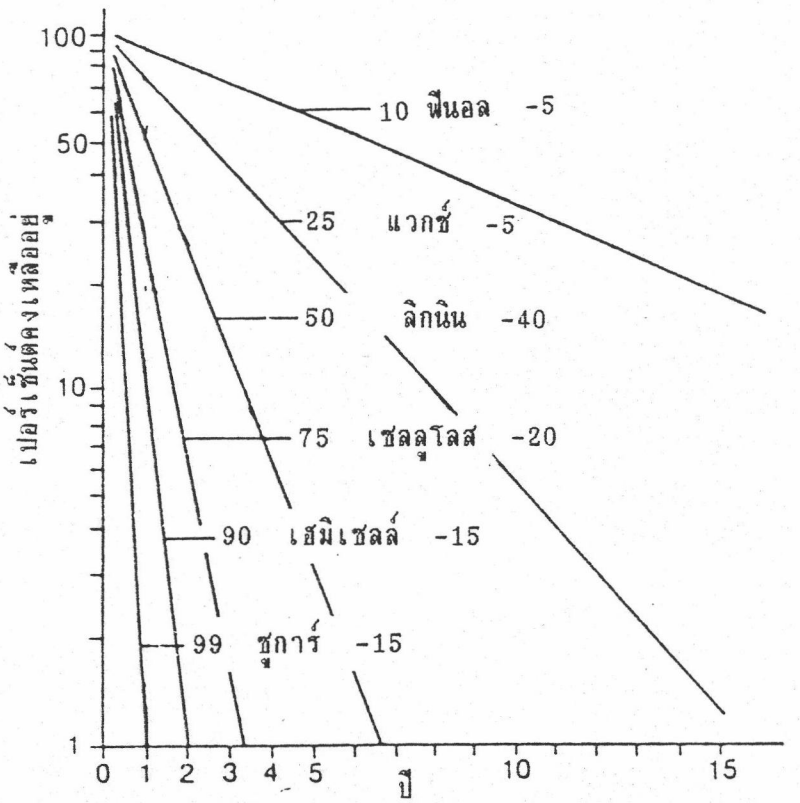
1980) ปริมาณอินทรีย์สารฟอสฟอรัส. 2 - 5% (Brookes และคณะ, 1985) ทั้งนี้สัดส่วนของแร่ธาตุที่อยู่ในมวลชีวภาพขึ้นอยู่กับชนิดของระบบนิเวศด้วย

2.3.1.3 **ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการย่อยสลายเศษซากใบไม้**

การย่อยสลายเศษซากใบไม้เป็นกระบวนการทางชีวเคมีที่มีต่อสัตว์ในดินเป็นหลัก ดังนั้นปัจจัยที่มีผลต่อกิจกรรมของสัตว์ในดินจึงมีผลต่ออัตราการย่อยสลายเศษซากพืชด้วย ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการย่อยสลายจึงสามารถแยกเป็น 2 กลุ่มหลัก คือ สารตั้งต้นที่เน้นในเชิงคุณภาพ และปริมาณเศษซากใบไม้กับปัจจัยทางสิ่งแวดล้อม

1. คุณภาพของเศษซากใบไม้

เป็นที่รู้กันดีว่าเศษซากที่มาจากพืชต่างชนิดกัน อัตราการย่อยสลายไม่เท่ากันแม้จะอยู่ภายใต้เงื่อนไขทางสิ่งแวดล้อมเดียวกัน ความแตกต่างนี้เนื่องมาจากความแตกต่างในเรื่ององค์ประกอบทางเคมีของเศษซากใบไม้แต่ละชนิด สัดส่วนความแตกต่างในเรื่องความผันแปรของอินทรีย์สารเนื่องจากชนิดของพืชต่างกัน ทำให้เนื้อเยื่อต่างกัน (Haynes, 1986) ซึ่ง Swift (1979) สรุปว่าเศษซากใบไม้ที่มีคุณภาพสูง คือมีแร่ธาตุอาหารสูง มีปริมาณลิกนินต่ำ เน่าเปื่อย ย่อยสลายและปลดปล่อยธาตุอาหารได้เร็วกว่า เศษซากใบไม้ที่มีคุณภาพต่ำ คือ มีแร่ธาตุอาหารต่ำ ปริมาณลิกนินสูง ความรู้เกี่ยวกับองค์ประกอบของสารอินทรีย์ในเศษซากใบไม้แต่ละชนิดสามารถพยากรณ์อัตราการย่อยสลาย และจำนวนสัตว์ขนาดเล็กในดินได้ ตัวอย่างเช่น แหล่งคาร์บอนที่ประกอบด้วยน้ำตาลอย่างง่ายจะเป็นอาหารต่อสัตว์ในดินได้เร็วกว่า โดยมีสัตว์ในดินจำนวนมากสามารถทำงานได้ ขณะที่ถ้าแหล่งคาร์บอนที่ประกอบด้วยน้ำตาลที่ซับซ้อน เช่น เซลลูโลสและลิกนินสูง อัตราการย่อยสลายช้า ทั้งนี้เนื่องจากมีสัตว์ในดินจำนวนน้อยที่เข้าทำงานได้ (Ross, 1989) ดังภาพ



ภาพที่ 3 กราฟแสดงการย่อยสลายแสดงช่วงเวลาต่าง ๆ ขององค์ประกอบแต่ละส่วนของอินทรีย์วัตถุ

- ตัวเลขข้างหน้าส่วนประกอบของอินทรีย์วัตถุ เป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่หายไปในช่วง 1 ปี
- ตัวเลขข้างหลังส่วนประกอบของอินทรีย์วัตถุ เป็นเปอร์เซ็นต์น้ำหนักส่วนประกอบต่าง ๆ ของอินทรีย์วัตถุจากเศษซากใบไม้เริ่มต้น

(การย่อยสลาย แสดงในรูปของฟังก์ชั่นลอกกาลิทึม)

ที่มา : ดัดแปลงจาก Ross (1989)

2. ปริมาณของเศษซากใบไม้

ปริมาณของเศษซากใบไม้จะมีผลโดยตรงการอัตราการย่อยสลาย ซึ่ง Burghouts และคณะ (1992) อัตราการย่อยสลายประจำปีจะขึ้นอยู่กับปริมาณการร่วงหล่นของเศษซากใบไม้ อัตราการย่อยสลายจะสูงเมื่อปริมาณการร่วงหล่นของเศษซากใบไม้สูง

3. ปัจจัยทางสิ่งแวดล้อม

ปัจจัยหลักสำคัญมี 3 ประการ คือ

1. pH เนื่องจากอัตราการย่อยสลาย เป็นผลมาจากการกระทำของสัตว์ในดิน ดังนั้น pH จึงเป็นตัวกำหนดการทำงานของจุลินทรีย์ดินและสัตว์ในดิน พบว่าช่วง pH ที่เหมาะสมที่ผู้ย่อยสลายทำงานได้สูงสุด คือ 7.5 และถ้า pH ต่ำกว่า 5 ทำให้ผู้ย่อยสลายสามารถมีกิจกรรมได้น้อยลง (William และ Gray, 1974) ดังนั้นเงื่อนไขที่เป็นกรดนำไปสู่อัตราการย่อยสลายที่ต่ำ โดยทั่วไปผลิตผลที่ได้จากการย่อยสลายเศษซากใบไม้จะเป็นกรดอินทรีย์และคาร์บอนไดออกไซด์ที่มาจากการหายใจของผู้ย่อยสลาย แต่ยังมีชั้นของอินทรีย์วัตถุที่ยังไม่ได้ย่อยสลายจะเป็นตัวควบคุมความเป็นกรดทำให้การย่อยสลายเศษซากใบไม้เกิดต่อไปได้ (Ross, 1989) Moore (1981) ศึกษาปัจจัยสำคัญที่ควบคุมอัตราการย่อยสลายของอินทรีย์วัตถุ พบว่าปัจจัยที่ยับยั้งการย่อยสลาย คือ อุณหภูมิ ความเป็นกรดสูง แต่ Baath และคณะ(1980) ศึกษาความเป็นกรดและด่างที่มีผลต่อการย่อยสลายในป่าสนพบว่าที่ความเป็นกรดต่ำเศษซากใบไม้มีการย่อยสลายทั้งส่วนที่เป็นใบและราก ขณะที่ความเป็นด่างการย่อยสลายเกิดขึ้นได้น้อยมาก ในแปลงทดลองที่มีความเป็นกรดสูง ปริมาณของเชื้อราและแบคทีเรียจะลดลง เทียบกับแปลงควบคุม แต่ความเป็นกรดจะทำให้จำนวนแมลงหางดีดเพิ่มขึ้น แต่จำนวนไรดินจะไม่เปลี่ยนแปลง pH ที่เหมาะสมที่สุดต่อการย่อยสลายคือ ช่วง 6 - 7 อย่างไรก็ตามการย่อยสลายเศษซากใบไม้จะถูกยับยั้งโดย pH ของดินที่ต่ำกว่า 4.5 และสูงกว่า 9 ซึ่งเป็นช่วงที่กิจกรรมและการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ดินเกิดได้น้อย

2. อุณหภูมิ เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ควบคุมอัตราการย่อยสลาย การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดินมีผลต่อชนิดและปริมาณของผู้ย่อยสลาย ซึ่งผู้ย่อยสลายแต่ละกลุ่มทำงานอุณหภูมิที่ต่างกัน และช่วงการเจริญเติบโตที่ต่างกัน (Haynes, 1986) กระบวนการย่อยสลายดูเหมือนว่าจะแปรผัน

ตามอุณหภูมิ อย่างไรก็ตามเมื่อรวมอุณหภูมิที่สูงและความชื้นสูงเข้าด้วยกัน จะมีผลต่อการย่อยสลายสูงกว่าอุณหภูมิสูงอย่างเดียว โดยมีผลโดยตรงต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ดังนั้นจึงคาดได้ว่าอัตราการย่อยสลายในเขตร้อนน่าจะสูงกว่าในเขตอบอุ่น (Odum, 1983)

3. ความชื้น เป็นปัจจัยที่สำคัญปัจจัยหนึ่งต่ออัตราการย่อยสลาย พบว่าปริมาณความชื้นจะสัมพันธ์กับความชุกชุมของผู้ย่อยสลาย ความชื้นสัมพัทธ์ 95 - 100% จะเหมาะต่อการเจริญเติบโตของสัตว์ขาข้อขนาดเล็กในดินที่สุด (Hutson, 1978; Crossley และ Hoglund, 1962) Frans (1962) รายงานว่าอัตราการย่อยสลายมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความชื้น นั่นคือ ถ้าความชื้นสูงอัตราการย่อยสลายสูงตามไปด้วย

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลาย

Cromack (1973) ศึกษาผลผลิตของเศษซากใบไม้และการย่อยสลายบริเวณป่าต้นน้ำที่โคว์ต้า สหรัฐอเมริกา พบว่าสัตว์ขาข้อขนาดเล็กมีผลต่อการย่อยสลายเศษซากใบไม้หลายชนิดมากกว่าชนิดเดียว นั่นคือ การปลดปล่อยแร่ธาตุการย่อยสลายเศษซากใบไม้หลายชนิดจะเร็วกว่าเป็นผลจากอัตราการย่อยสลายที่สูงกว่า ซึ่งได้ให้ข้อสังเกตว่า อัตราการย่อยสลายที่สูงนี้มีผลต่อจำนวนสัตว์ขาข้อที่มีผลต่ออัตราการย่อยสลาย

Egunjobi (1974) ได้ทำการศึกษาการร่วงหล่นของเศษซากใบไม้ในสวนป่าสักในประเทศไนจีเรีย พบว่าการร่วงหล่นของเศษซากใบไม้ของสัก (ใบ, ราก, ดอก, กิ่งก้าน) จะมากในช่วงเดือนธันวาคมถึงมีนาคม ในสวนสักที่มีอายุมากขึ้นก็พบการร่วงหล่นของเศษซากใบไม้เพิ่มมากขึ้นด้วย และจากการวิเคราะห์ธาตุอาหารในเศษซากใบไม้ของสักโดยเฉลี่ยตลอดปี ตรวจพบธาตุอาหารพืช คือ ไนโตรเจน โปตัสเซี่ยม ฟอสฟอรัส แคลเซี่ยม และแมกนีเซียม พบว่ามากกว่า 90% ของธาตุอาหารในเศษซากใบไม้พบในส่วนของใบ และการหมุนเวียนแร่ธาตุอาหารโดยสมบูรณ์จะใช้เวลาน้อยกว่า 6 เดือน

Seastedt (1984) ศึกษาบทบาทของสัตว์ขาข้อขนาดเล็กในกระบวนการย่อยสลายและกระบวนการเปลี่ยนแปลงสารอินทรีย์เป็นสารอนินทรีย์ พบว่าสัตว์ขาข้อขนาดเล็กมีผลต่อการสูญหายของเศษซากใบไม้ มีการเพิ่มขึ้นของอัตราการย่อยสลายในช่วงเวลา 9 ถึง 30 เดือน เฉลี่ยประมาณ 23% การเพิ่มการเปลี่ยนแปลงเป็นธาตุอาหารของไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และ

โปตัสเซี่ยม ครึ่งหนึ่งของการศึกษา พบว่าสัตว์ขาข้อขนาดเล็กมีผลโดยอ้อมต่อการหมุนเวียนสารอาหารโดยจะมีผลต่อการหายไปของมวลชีวภาพของเศษซาก เนื่องจากไปกระตุ้นให้เกิดการหายใจของจุลินทรีย์ดิน ซึ่งการหายใจจะมีผลต่อกระบวนการเปลี่ยนเป็นแร่ธาตุอาหาร (mineralization) ของคาร์บอนเท่านั้น แต่ให้ผลตรงข้ามกับแร่ธาตุตัวอื่นในเนื้อเยื่อของจุลินทรีย์ ซึ่งส่วนใหญ่จะมีการหมุนเวียนแร่ธาตุใหม่ โดยผ่านการเน่าเปื่อย ซึ่งผลดังกล่าวสังเกตภายใน 1 ปี ส่วนการย่อยสลายในระยะยาวและปริมาณแร่ธาตุอาหาร ได้ให้ข้อสังเกตว่ากระบวนการเปลี่ยนแปลงเป็นแร่ธาตุของไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และประจุบวกนั้นจะเพิ่มขึ้นในกระบวนการย่อยสลายเศษซากใบไม้ที่แก่กว่า ซึ่งเป็นผลจากการกินอาหารของสัตว์ขาข้อขนาดเล็ก

Vitousek (1984) ศึกษาเศษซากใบไม้ที่ร่วงหล่น การหมุนเวียนแร่ธาตุและขีดจำกัดของแร่ธาตุในป่าเขตร้อน พบว่าปริมาณธาตุไนโตรเจนในป่าเขตร้อนสูงกว่าเขตอบอุ่น ส่วนน้ำหนักและสัดส่วนไนโตรเจนในเศษซากใบไม้ต่ำกว่าเขตอบอุ่น แคลเซี่ยมมีการหมุนเวียนสูงที่สุดในป่าเขตร้อน ในขณะที่ฟอสฟอรัสในป่าเขตร้อนมีการหมุนเวียนน้อย

Agbim (1987) ศึกษาอัตราการย่อยสลายเศษซากใบไม้ 5 ชนิด คือ วัชพืชสยาม (Siam weed) มะม่วงหิมพานต์, Acioa, หญ้าสามง่าม (spear grass) และถั่วน้ำมัน (oil bean) พบว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 และปริมาณคาร์บอนรวมที่สูญหายไปกับกิจกรรมการหายใจเรียงตามลำดับจากมากไปหาน้อยดังนี้คือ หญ้าสามง่าม > วัชพืชสยาม > มะม่วงหิมพานต์ > ถั่วน้ำมัน > Acioa ปริมาณเศษซากใบไม้ที่ถูกย่อยสลายไปสูงสุดคือ วัชพืชสยาม (58.3%), หญ้าสามง่าม (52.3%) และมะม่วงหิมพานต์ (34.3%)

Holland และ Coleman (1987) ศึกษาการร่วงหล่นของเศษซากใบไม้ที่มีผลต่อจุลินทรีย์และการหมุนเวียนของอินทรีย์วัตถุในระบบนิเวศเกษตรกรรม การหมุนเวียนอินทรีย์วัตถุในระบบนิเวศเกษตรกรรมโดยเกี่ยวข้องกับการกระทำของจุลินทรีย์พบว่า ในเศษซากใบไม้ที่มีราเป็นชนิดเด่น มีผลทำให้การหมุนเวียนแร่ธาตุหรืออินทรีย์วัตถุเป็นไปได้ช้ากว่าเศษซากใบไม้ที่มีแบคทีเรียเป็นชนิดเด่น

Chapman และคณะ (1988) ได้ศึกษาเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของแร่ธาตุอาหารโดยศึกษาจากเศษซากใบไม้ของไม้โอ๊ค 2 ชนิด เปรียบเทียบกับเศษซากใบไม้จากใบโอ๊คชนิด

เดียวและเศษซากใบไม้จากสน 2 ชนิด เปรียบเทียบกับเศษซากใบไม้จากสนชนิดเดียว พบว่าชนิดของเศษซากพืชมีความสัมพันธ์กับปริมาณแร่ธาตุอาหารและอัตราการย่อยสลายเศษซากใบไม้ซึ่งทำให้มีการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นและลดลงของแร่ธาตุอาหาร ตลอดจนการเปลี่ยนสังคมของผู้ย่อยสลาย (decomposer community) บนพื้นป่า สามารถใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงในด้านการเจริญเติบโตของต้นในสวนป่าผสมเปรียบเทียบกับสวนป่าไม้สืนต้นชนิดเดียวและปฏิสัมพันธ์ระหว่างสัตว์ในดินกับจุลินทรีย์ในดิน ในการย่อยสลายมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแร่ธาตุอาหารด้วย

Lal (1988) ศึกษาผลของสัตว์ในดินต่อสมบัติของดินในระบบนิเวศเขตร้อน พบว่าการทำการเกษตรในรูปแบบต่าง ๆ มีอิทธิพลต่อประชากรและความหลากหลายของชนิดและกิจกรรมของสัตว์ในดิน วิธีการที่ว่านั้นรวมไปถึงการเปิดหน้าดิน การไถพรวน การปลูกพืชชนิดเดียว (Monoculture) และการเกษตรที่ใช้สารเคมี เทคนิคการจัดการดินที่ส่งเสริมกิจกรรมของสัตว์ในดิน ได้แก่ การใช้วัสดุคลุมดิน ไม่มีการไถพรวน การปลูกพืชคลุมดิน การทำวนเกษตรและการรวมระบบนิเวศต่าง ๆ เข้าด้วยกัน มีผลต่อการเพิ่มจำนวนชนิดและกิจกรรมของสัตว์ในดิน ยังพบว่าการลดลงของคุณภาพดินในเขตร้อนมีผลอย่างรุนแรงต่อกิจกรรมและความหลากหลายของสัตว์ในดิน

Sharma และ Pande (1989) ศึกษาปริมาณของสารอาหารเศษซากใบไม้ในระบบนิเวศสวนป่าที่เคอราลา อินเดีย พบว่าเศษซากใบไม้ของสักประกอบด้วยไนโตรเจน 1.1%, ฟอสฟอรัส 0.08%, โปแตสเซี่ยม 0.65%, แคลเซี่ยม 1.2% และแมกนีเซียม 0.15% ซึ่งปริมาณของไนโตรเจนและแคลเซี่ยมสูงกว่าโปตัสเซี่ยม ฟอสฟอรัส และแมกนีเซี่ยม ทั้งได้พิสูจน์ให้เห็นว่าการผันแปรของสารอาหารในเศษซากใบไม้แต่ละชนิด แต่ละบริเวณไม่ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของพืช แต่ขึ้นอยู่กับผลรวมของสถานะทางสารอาหารในดิน รูปแบบการเจริญเติบโตของพืชแต่ละชนิดและระยะเวลาที่ใช้ในการเจริญเติบโตของพืช

Aborisade และ Aweto (1990) ศึกษาสมบัติของดินในสวนป่าปลูกสัก ส่วนป่าปลูกซ้อ เทียบกับในป่าธรรมชาติทางตะวันตกเฉียงใต้ของไนจีเรีย พบว่าสมบัติของดินในสวนป่าที่ปลูกสักและสวนป่าที่ปลูกซ้อในด้านความพรุนจะน้อยกว่าป่าธรรมชาติ ความหนาแน่นของดินสวนป่าที่ปลูกสักและสวนป่าที่ปลูกซ้อจะมากกว่าในป่าธรรมชาติ ในด้านปริมาณแร่ธาตุอาหาร

ปริมาณอินทรีย์คาร์บอน ปริมาณไนโตรเจนรวม แคลเซี่ยม แมกนีเซี่ยม โปตัสเซี่ยมในสวนป่าปลูกสักและส่วนป่าปลูกซ้อจะต่ำกว่าในป่าธรรมชาติ แต่ที่น่าสนใจคือ ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ไม่แตกต่างกันในระบบนิเวศทั้ง 3 แบบ ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนและปริมาณแร่ธาตุในสวนป่าปลูกมีน้อยกว่าในป่าธรรมชาติ อาจเป็นเพราะอินทรีย์คาร์บอนอาจถูกเผาไหม้หรือการหมุนเวียนแร่ธาตุที่ถูกพืชในสวนป่าดึงไปใช้อย่างรวดเร็วจึงทำให้มีในปริมาณน้อย

Coleman และคณะ (1990) ได้ศึกษาฤดูกาลและสัตว์ในดินที่มีผลต่อการย่อยสลายในทุ่งหญ้าแพรี่กับในป่าสน พบว่าการลดลงของผู้ล่าจุลินทรีย์ในระบบทำให้มีความหนาแน่นของสัตว์ในดินสูง นำไปสู่การเพิ่มอัตราการย่อยสลาย และในระบบที่มีจำนวนสัตว์ในดินน้อยมีผลทำให้อัตราการย่อยสลายช้าด้วย เศษซากใบไม้ที่มีอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนสูงจะทำให้อัตราการย่อยสลายช้ามาก ในเชิงสายใยอาหารพบว่าในทุ่งหญ้า 2 ชนิด จะมีแบคทีเรียเป็นตัวเด่น ในขณะที่ในป่าจะมีราเป็นตัวเด่น ทั้งนี้โดยพิจารณาจากนีมาโทดที่กินแบคทีเรียมีชุกชุมมากในทุ่งหญ้าทั้งสอง ขณะที่สัตว์ขาข้อขนาดเล็กที่กินราพบชุกชุมในป่าสน

Reddy และ Venkataiah (1990) ศึกษาถึงผลกระทบของสวนป่าต่อโครงสร้างของสัตว์ในดินในฤดูกาลต่าง ๆ ในทุ่งหญ้ากึ่งแห้งแล้งในเขตร้อนชื้น โดยเปรียบเทียบระหว่างประชากรของสัตว์ในดินในทุ่งหญ้าและสวนป่าบริเวณเทเลนกานา อินเดียตอนใต้ ทำการสำรวจตั้งแต่ปี 1985 - 1987 พบว่าแมลงหางดีดเป็นสัตว์ในดินกลุ่มเด่นที่สุด รองลงมาคือไรดิน พบสัตว์ในดินน้อยที่สุดในฤดูร้อน และมากที่สุดในฤดูฝน โดยพบในสวนป่ามากกว่าในทุ่งหญ้า ในทุ่งหญ้านั้นสัตว์ในดินจะพบบริเวณผิวหน้าดินมากกว่าในดินชั้นลึกลงไป ส่วนสวนป่าจะพบสัตว์ในดินทั้ง 2 ชั้น ขณะที่ไรดินจะอาศัยอยู่ในดินทั้ง 2 ชั้น (ผิวดินและชั้นลึกลงไป) โดยเฉพาะฤดูฝน

Burghouts และคณะ (1992) ได้ศึกษาการย่อยสลายของเศษซากใบไม้และสัตว์ในดินในป่าธรรมชาติเปรียบเทียบกับป่าธรรมชาติที่มีการเลือกตัดไม้ ในรัฐซาบาร์ มาเลเซีย พบว่าอัตราการร่วงหล่นของเศษซากใบไม้ในป่า 2 ชนิด อัตราการย่อยสลาย ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และไม่ขึ้นอยู่กับการกระจายและปริมาณน้ำฝน อัตราการย่อยสลายประจำปีเพิ่มขึ้นตามปริมาณการร่วงหล่นของเศษซากใบไม้ ความชุกชุมของสัตว์ในดินเพิ่มขึ้นตามมวลของเศษซากใบไม้ที่เพิ่มขึ้น ความชุกชุมของสัตว์ในดินในป่าธรรมชาติสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญ สัตว์ในดิน

ที่พบมากที่สุดในป่าดิบแล้งธรรมชาติ คือ ไรดิน แมงป่องเทียม และปลวก ส่วนในป่าดิบแล้งที่มีการเลือกตัดไม้ จะพบสัตว์ในดินได้แก่ มด แมลงหางดีด แมงมุม ตัวกะปี และไรดินสูงกว่าในป่าดิบแล้งธรรมชาติ

Parrotta (1992) ได้ศึกษาบทบาทของการปลูกสวนป่าในการฟื้นสภาพระบบนิเวศในเขตร้อนที่เสื่อมสภาพ พบว่าสวนป่าที่ปลูกพืชเอนกประสงค์มีบทบาทสำคัญที่ทำให้ผลผลิตเสถียรภาพของระบบนิเวศและความหลากหลายของสิ่งมีชีวิตกลับคืนมาเหมือนเดิม การศึกษาเปรียบเทียบระหว่างสวนป่าที่ปลูกจามจุรี (Albiziz lebbek) กับทุ่งหญ้า ผลการศึกษาพบว่าปริมาณแร่ธาตุในดินอินทรีย์คาร์บอน ปริมาณไนโตรเจนรวม มวลชีวภาพของพืชในสวนป่าสูงกว่าทุ่งหญ้า แต่ปริมาณฟอสฟอรัส และความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกไม่แตกต่างกันทั้งสองระบบนิเวศ นอกจากนั้นพบว่าความหลากหลายของชนิดของสิ่งมีชีวิตนั้นพบในสวนป่าสูงกว่าทุ่งหญ้าอีกด้วย

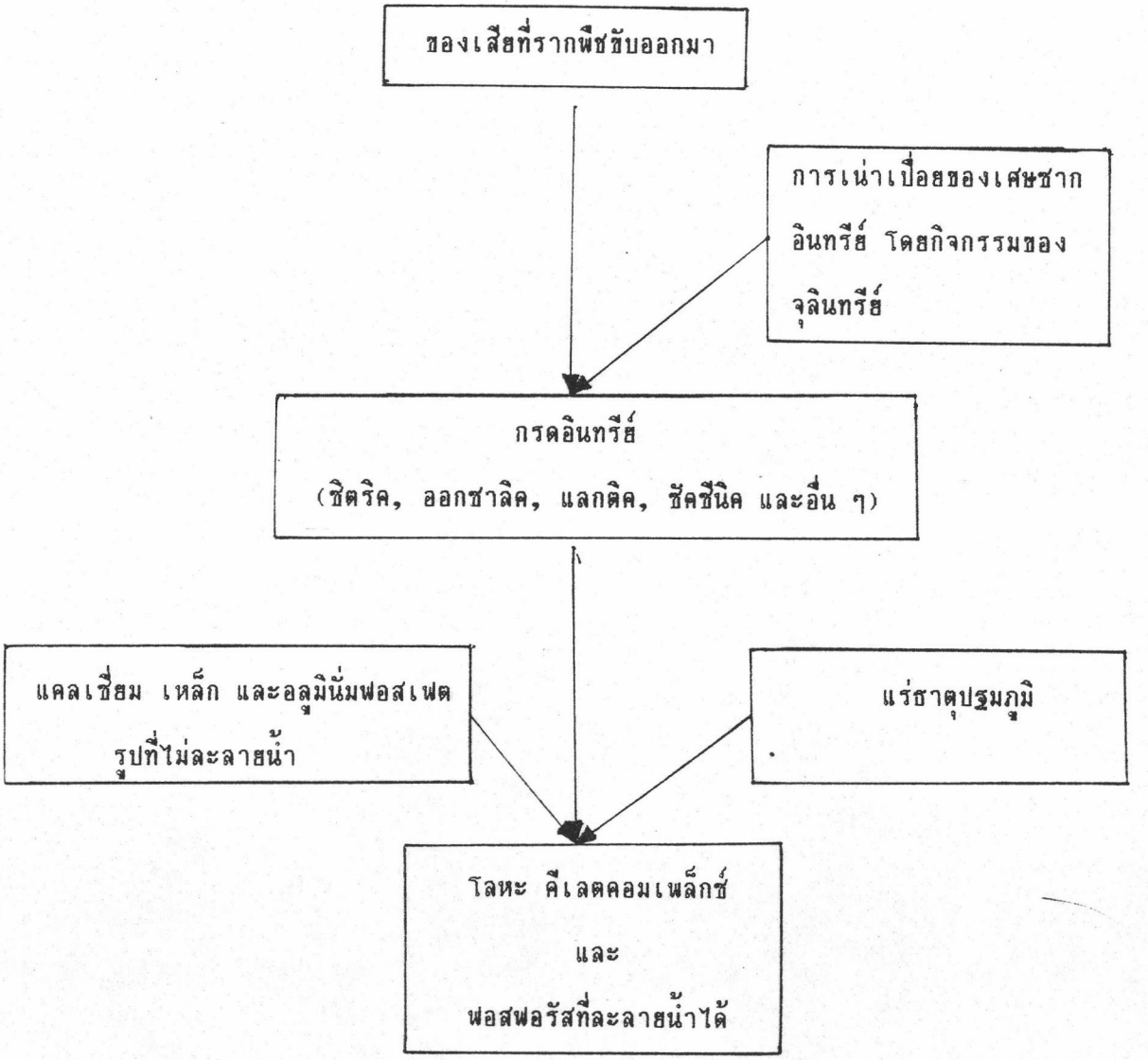
Metta (1993) ศึกษาผลของการย่อยสลายเศษซากใบไม้ต่อความอุดมสมบูรณ์ของดินนา โดยใช้ใบกระบก จามจุรี มะขาม เต็ง แดง พลวง พบว่าอัตราการย่อยสลายเรียงตามลำดับดังนี้ ใบแดง > ใบจามจุรี _ ใบเต็ง > ใบพลวง > ใบมะขาม > ใบกระบก ได้วิเคราะห์องค์ประกอบของสารอาหารในใบไม้แต่ละชนิด พบว่ามะขามประกอบด้วยสารอาหารดังนี้คือ คาร์บอน 45.97%, ไนโตรเจน 0.89%, ฟอสฟอรัส 0.06%, โปแตสเซี่ยม 0.23%, แคลเซี่ยม 2.30% และแมกนีเซี่ยม 0.398%

Sankaran (1993) ศึกษาการย่อยสลายของเศษซากใบไม้ของจามจุรี ยูคาลิปตัส และสัก ที่เคอราลา อินเดีย พบว่าเศษซาใบไม้ของสักมีค่าคงที่ของการย่อยสลายสูงสุด (2.0) และใช้เวลาที่ทำให้ย่อยสลายได้ครึ่งหนึ่งน้อยที่สุด (4.2 เดือน) ในด้านกิจกรรมของจุลินทรีย์การย่อยสลายของเศษซากใบไม้สักมีปริมาณของฟังไจและแบคทีเรียเข้าทำงานสูงที่สุดตลอดระยะเวลาการย่อยสลาย

2.3.3 <u>อิทธิพลของอินทรีย์วัตถุต่อการละลายของอนินทรีย์ฟอสฟอรัส</u>

จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มความเป็นประโยชน์ได้ของฟอสฟอรัสในดินนั้นสามารถกระทำได้โดยการเพิ่มอินทรีย์วัตถุในดิน มีเหตุผลหลายประการที่สนับสนุน ดังนี้ คือ

1. ฟอสฟอรัสที่รวมตัวกับ แคลเซี่ยม (Ca), เหล็ก (Fe) และอลูมินั่ม (Al) เป็นรูปของฟอสฟอรัสที่ไม่ละลายน้ำนั้น อาจจะละลายได้โดยปฏิกิริยาของกรดอินทรีย์ และอินทรีย์คีเลตอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างการสลายตัวของอินทรีย์วัตถุ



ภาพที่ 4 ขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงของฟอสฟอรัสจากรูปที่ไม่ละลายน้ำให้เป็นประโยชน์กับพืช โดยการกระทำของกรดอินทรีย์และการเกิดคีเลตตามธรรมชาติ

ที่มา : Stevenson (1986)

ซึ่งมีงานวิจัยที่สนับสนุนโดย Dalton และ Russel (1952) พบว่าการเพิ่มอินทรีย์วัตถุให้กับดินเพื่อจะแก้ไขให้มีการเพิ่มปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ที่พืชสามารถดูดไปใช้ได้ให้กับดินโดยกรดอินทรีย์ที่ได้จากการย่อยสลายแบบง่าย ๆ มีผลในการเพิ่มปริมาณฟอสฟอรัสมากกว่ากรดอินทรีย์ที่ย่อยสลายช้า ฟอสเฟตที่ถูกดูดซับด้วยเหล็กและอลูมินั่มจะเกี่ยวข้องกับแหล่งของฟอสเฟตที่พืชดูดไปใช้ได้ต่ำ ขณะเดียวกันบทบาทของอินทรีย์วัตถุในการที่จะทำให้ฟอสเฟตในดินเป็นประโยชน์ น่าจะมาจากผลผลิตจากเมตาโบลิซึมของจุลินทรีย์จากการย่อยสลาย ทำให้โมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์ที่ซับซ้อนที่จับอยู่กับเหล็กและอลูมินั่มซึ่งเดิมดูดซับฟอสเฟตอยู่สามารถปลดปล่อยฟอสเฟตในรูปที่เป็นประโยชน์ ต่อมา Lopez-Hernandez และ Burnham (1974) ยังได้พบความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซับฟอสเฟตกับปัจจัยต่าง ๆ ในดินเขตร้อน และดินบริติลได้ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอินทรีย์วัตถุกับการลดการดูดซับฟอสเฟตเป็นไปในเชิงบวก เนื่องจากการเพิ่มเศษซากใบไม้และอินทรีย์วัตถุในดิน ซึ่งส่งเสริมให้โครงสร้างของดินดีขึ้น ประโยชน์จากการเพิ่มอินทรีย์วัตถุในดินที่มีเศษซากใบไม้สม่ำเสมอ เป็นการลดการดูดซับฟอสฟอรัสในดินโดยเหล็กและอลูมินั่มทำให้ฟอสฟอรัสที่ถูกตรึงด้วยเหล็กและอลูมินั่มไฮดรอกไซด์สามารถละลายได้เพิ่มขึ้น ทำให้เพิ่มฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืชโดยตรง (Jordan and Lee, 1990) Evans (1985) พบว่าปริมาณการดูดซับของฟอสเฟตลดลงอย่างมีนัยสำคัญขณะเพิ่มอินทรีย์สารที่ละลายได้ลงไป นอกจากนี้ยังพบว่าสัดส่วนของฟอสฟอรัสที่ขาดแคลนไม่ใช่เป็นเพราะฟอสฟอรัสทั้งหมดในดินมีน้อย แต่เป็นเพราะฟอสเฟตที่ถูกตรึงด้วยเหล็กและอลูมินั่มมากกว่า (Uehara และ Gillman, 1981) ดังนั้นขณะที่เติมกรดอินทรีย์ชนิดฮิวมิคลงไปในสารละลายดินสามารถลดการตรึงฟอสเฟตในดินเขตร้อนได้ (Siband and Young, 1986) โดยกรดอินทรีย์จะเป็นตัวคีเลตกับเหล็กและอลูมินั่ม ทำให้ฟอสเฟตถูกปล่อยออกมาเป็นประโยชน์ได้ ซึ่งสามารถยืนยันด้วยการทดลองของ Lee และ Jordan (1990) ซึ่งพบว่าในดินที่มีสารประกอบคาร์บอนสูงทำให้การดูดซับฟอสฟอรัสน้อยเหตุผลเกี่ยวกับระดับของการแลกเปลี่ยนอลูมินั่มอิออนในดิน ปฏิกิริยาระหว่างฟอสฟอรัสกับอลูมินั่มนี้มีพันธะที่แข็งแรงน้อยกว่า พันธะระหว่างโลหะ (Al, Fe) กับกรดอินทรีย์ ดังนั้นเมื่อมีอินทรีย์วัตถุในดินสูงฟอสฟอรัสที่ถูกจับกับอลูมินั่มจึงถูกแทนที่ ทำให้ฟอสฟอรัสถูกปลดปล่อยออกมาในรูปที่เป็นประโยชน์สูงขึ้น ปฏิกิริยาที่นำไปสู่การเปลี่ยนรูปฟอสฟอรัสเป็นรูปที่ละลายน้ำได้เป็นดังนี้

$$Al(Fe)\ (H_2O)_3\ (OH)_2\ H_2PO_4 + \text{Chelate} \longrightarrow \text{Soluble } PO_4^{3-} + \text{Al(Fe) Chelate complex}$$

2. กรดอินทรีย์ที่ผลิตขึ้นในระหว่างการสลายตัวแตกตัวให้อนุมูลลบซึ่งเข้าไปไล่ที่การแก่งแย่งพื้นที่ฟอสเฟตที่ถูกตรึงอยู่ที่ผิวของคอลลอยด์ดูดยึดบริเวณผิวของคอลลอยด์ดินกับฟอสเฟต ช่วยลดการตรึงฟอสฟอรัสลงทำให้มีฟอสฟอรัสในสารละลายดินมากขึ้น

Lopez-Hernandez และคณะ (1986) พบว่ากรดอินทรีย์ที่แตกตัวเป็นอิออนลบจะแก่งแย่งเพื่อหาตำแหน่งจับกับฟอสเฟต การจับจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของกรดอินทรีย์สูงขึ้น ทำให้ฟอสเฟตในรูปที่เป็นประโยชน์ถูกปลดปล่อยออกมา

Traina และคณะ (1986) ศึกษาผลของ pH และกรดอินทรีย์ต่อความสามารถในการละลายของออร์โทฟอสเฟตในดินมอนท์มอริลโลไนต์ พบว่าถ้าไม่ใส่กรดอินทรีย์ลงไปในดินความสามารถในการละลายของออร์โทฟอสเฟตลดลง เมื่อเพิ่ม pH จาก 4 เป็น 7 เพิ่มออร์โทฟอสเฟตลงไปผลทำให้ความเข้มข้นของฟอสเฟตที่ละลายในน้ำต่ำ เพราะดินดูดซับออร์โทฟอสเฟตที่ pH 7 ได้สูงกว่า pH 5.5 เมื่อเติมกรดอินทรีย์ในระดับความเข้มข้นต่ำปฏิกิริยาจะถูกดูดซับ โดยโพลีเมอริกไฮดรอกไซด์อลูมินั่มกับลิแกนอินทรีย์ (Organic Ligand) ที่จะรวมตัวกับอลูมินั่มที่แลกเปลี่ยนได้ เป็นผลให้ความสามารถในการละลายของออร์โทฟอสเฟตลดลง แต่เมื่อเติมกรดอินทรีย์ในระดับความเข้มข้นสูง จะทำให้คอมเพล็กซ์ของอลูมินั่มที่จะรวมตัวเป็นอลูมินั่มอินทรีย์คอมเพล็กไม่สามารถเข้าไปจับกับออร์โทฟอสเฟตได้ จึงทำให้ออร์โทฟอสเฟตที่ละลายได้สูงขึ้น

3. กรดอินทรีย์อาจจะไปห่อหุ้มผิวของคอลลอยด์ของเซสคิวออกไซด์ของเหล็กและอลูมินั่ม (Colloidal sesquioxides, Al, Fe oxide) เป็นกรดลดการดูดตรึงของฟอสฟอรัสลง ซึ่งยืนยันด้วยงานวิจัยของ Triana และคณะ (1986) เช่นกัน

4. การเติมอินทรีย์วัตถุในดิน อาจจะก่อให้เกิดการเพิ่มปริมาณการปล่อยของอนินทรีย์ฟอสฟอรัสจากแหล่งฮิวมัสในดินมากขึ้น

Lee และ Jordan (1990) ได้ข้อสรุปจากงานวิจัยว่า การเพิ่มของ

Lee และ Jordan (1990) ได้ข้อสรุปจากงานวิจัยว่า การเพิ่มของอินทรีย์วัตถุเป็นผลให้เพิ่มฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ กลไกของกิจกรรมอาจมีปัจจัยอื่นเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่ง Borggarard และคณะ (1990) พบว่าอินทรีย์วัตถุมีผลทางอ้อมต่อการดูดตรึงฟอสเฟต โดยไปยับยั้งการรวมตัวของฟอสเฟตกับอลูมินั่มออกไซด์โดยที่ความสามารถในการดูดซับฟอสเฟตเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณอลูมินั่มและเหล็ก โดยไม่คำนึงถึงปริมาณอินทรีย์วัตถุ ทั้งนี้จะเห็นได้จากเมื่อเอาอินทรีย์วัตถุออกไปทำให้การดูดตรึงฟอสเฟตเปลี่ยนแปลงไป ยังพบอีกกว่าปริมาณอลูมินั่มออกไซด์มีผลต่อการดูดตรึงฟอสเฟตมากกว่าเหล็ก

ในที่สุด Jordan และ Lee (1990) ได้สรุปให้ข้อเสนอแนะว่า ระบบวนเกษตรซึ่งเป็นระบบที่ให้เศษซากใบไม้สม่ำเสมอ เป็นการเพิ่มเศษซากใบไม้และให้อินทรีย์วัตถุให้กับดิน ซึ่งส่งเสริมให้โครงสร้างของดินดีขึ้น ประโยชน์จากการเพิ่มเศษซากใบไม้และอินทรีย์วัตถุในดินในระบบวนเกษตรเป็นการลดการดูดซับฟอสเฟตในดินซึ่งถูกดูดซับโดยเหล็กและอลูมินั่ม โดยฟอสเฟตจะสามารถละลายได้เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ ปัทมา วิตยากร (2534) พบว่าการใช้ดินและการจัดการดินมีอิทธิพลอย่างสูงต่อปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินและความอุดมสมบูรณ์ของดิน โดยดินในระบบนิเวศที่ได้รับอินทรีย์วัตถุกลับคืนสม่ำเสมอ เช่น ดินป่าไม้หรือระบบที่มีการใส่ปุ๋ยอินทรีย์จะมีอินทรีย์วัตถุ ความจุการแลกเปลี่ยนไอออนบวกและปริมาณธาตุอาหาร ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โปตัสเซี่ยม สูงกว่าดินที่มีการใช้ที่ดินที่มีการให้กลับคืนของอินทรีย์วัตถุต่ำ