บทที่ 5

อภิปรายผล

5.1 ปัจจัยที่มีผลต่อความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัส

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัส ในระหว่างการย่อยสลายที่ช่วงเวลาต่าง ๆ กัน จากการวิจัยครั้งนี้พบความสัมพันธ์ดังนี้ (ภาคผนวกที่ 17)

ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ เรียงตามลำดับค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จากมากไปหาน้อย ดังนี้

1. ระยะเวลา	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) = 0.87
2. ค่าความจุของการแลกเปลี่ยนประจุบวก	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) = 0.63
ระยะเวลาที่ทำให้ย่อยสลายได้ครึ่งหนึ่ง	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) = 0.63
3. ปริมาณไนโตรเจนรวม	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) = 0.51
4. อินทรีย์วัตถุ	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) = 0.39
ดัชนีความหลากหลายทางชีวภาพของ	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) = 0.39
สัตว์ในดิน	
5. ฟอสฟอรัสรวม	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) = 0.15
6. ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) = 0.14

ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์เชิงลบกับปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ เรียงตามลำดับค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จากมากไปหาน้อย ดังนี้

1. อลูมินั่ม	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) = -0.73
2. อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน	
ต่อฟอสฟอรัส	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) = -0.57
3. อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) = -0.50
4. คาร์บอน	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) = -0.25

5. ค่าคงที่ของการย่อยสลาย เอ็กโพแนนเชียล สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) = -0.08

ความสัมพันธ์ของปัจจัยต่าง ๆ แต่ละปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินจากการย่อยสลายเศษซากใบไม้เป็นดังนี้

5.1.1 ระยะเวลา

จากการวิจัยพบว่าปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการย่อยสลายนั้นมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับระยะเวลา หมายความว่าเมื่อระยะเวลาของการย่อยสลายเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r = 0.87) เป็นความสัมพันธ์สูงสุด ด้วยระดับความเชื่อมั่นทางสถิติที่ระดับ .001 (ภาคผนวกที่ 17) ซึ่งการเพิ่มขึ้นของปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในช่วงเริ่มต้นของการย่อยสลายเศษซากใบไม้ต่ำ ทั้งนี้เป็นผลมาจากกระบวนการย่อยสลายยังไม่เกิดขึ้น แต่เมื่อระยะเวลาการย่อยสลายเพิ่มขึ้นโดยช่วง 0 - 4 เดือน อัตราการเพิ่มของปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์เป็นไปอย่างช้า ๆ และเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 4 - 8 เดือนของการย่อยสลายเศษซากใบไม้โดยรวมในทุกกลุ่มเศษซากใบไม้ ซึ่งสามารถอธิบายถึงสาเหตุการเพิ่มของปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ด้วยปริมาณอินทรีย์วัตถุที่ได้จากการย่อยสลาย ในช่วงเริ่มต้นด้วยเหตุผลซึ่งกล่าวไปแล้วว่ากระบวนการย่อยสลายยังไม่เกิดขึ้น แต่เมื่อระยะเวลาของการย่อยสลายเพิ่มขึ้น ปริมาณอินทรีย์วัตถุที่ปลดปล่อยออกมาระหว่างกระบวนการย่อยสลายจะเพิ่มขึ้น โดยปริมาณอินทรีย์วัตถุน่าจะไปแย่งจับกับอลูมินั่มซึ่งเดิมจับฟอสฟอรัสอยู่ ทำให้ฟอสฟอรัสในดินที่ถูกอลูมินั่มยึดไว้ถูกปลดปล่อยออกมา ประกอบกับฟอสฟอรัสบางส่วนเกิดจากกระบวนการเปลี่ยนแปลงแร่ธาตุอาหาร (mineralization) โดยจุลินทรีย์ในระหว่างเกิดกระบวนการย่อยสลายเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น จึงทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์เพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาของการย่อยสลาย

5.1.2 อลูมินั่ม

จากการวิเคราะห์ปริมาณอลูมินั่มที่สกัดได้ แล้วนำไปหาค่าความสัมพันธ์กับปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน พบว่าปริมาณอลูมินั่มมีความสัมพันธ์เชิงลบกับปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน หมายความว่าเมื่อปริมาณอลูมินั่มที่สกัดได้ในช่วงเวลาต่าง ๆ ลดลง มีผลทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์เพิ่มขึ้น เป็นความสัมพันธ์ที่ค่อนข้างสูงรองจากระยะเวลา ($r = -0.73$) ด้วยระดับความเชื่อมั่นทางสถิติ ที่ระดับนัยสำคัญ .001 (ภาคผนวกที่ 17) ซึ่งปริมาณของอลูมินั่มที่ค่อนข้างสูงในช่วงเริ่มต้นของการย่อยสลาย เป็นผลมาจากกระบวนการย่อยสลายยังไม่เกิดขึ้น หรือเกิดขึ้นแล้วแต่ช้ามาก ปริมาณอินทรีย์วัตถุยังไม่ถูกปลดปล่อยออกมามากนัก แต่เมื่อกระบวนการย่อยสลายเริ่มเกิดขึ้นในอัตราที่สูง นั่นคือ ปริมาณน้ำหนักเศษซากใบไม้ที่หายสูง ปริมาณอินทรีย์วัตถุเริ่มถูกปลดปล่อยออกมาสูงขึ้น เป็นผลให้อินทรีย์วัตถุไปแย่งจับกับปริมาณอลูมินั่มในดิน ซึ่งเริ่มต้นของกระบวนการย่อยสลายมีสูง ทำให้ปริมาณอลูมินั่มที่สกัดได้ลดลงตลอดช่วงเวลาของการย่อยสลาย เป็นผลให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ถูกปลดปล่อยออกมาสูงขึ้น เมื่อระยะเวลาของการย่อยสลายเพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดลองนี้ยืนยันโดย Borgaard และคณะ (1990) ที่พบว่าอินทรีย์วัตถุมีผลทางอ้อมต่อการดูดตรึงฟอสเฟต โดยทำหน้าที่ไปขัดขวางการรวมตัวของฟอสเฟตกับอลูมินั่มออกไซด์ โดยที่ความสามารถในการดูดซับฟอสเฟตเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณอลูมินั่มและเหล็ก โดยไม่คำนึงถึงปริมาณอินทรีย์วัตถุ ทั้งนี้จะเห็นได้จากเมื่อเอาอินทรีย์วัตถุออก ไม่ทำให้การดูดตรึงฟอสเฟตเปลี่ยนแปลงไป

5.1.3 ค่าความจุของการแลกเปลี่ยนประจุบวก

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุของการแลกเปลี่ยนประจุบวกกับปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน พบว่ามีความสัมพันธ์กันในเชิงบวกด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ($r = 0.63$) ด้วยระดับความเชื่อมั่นทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ .001 หมายความว่าเมื่อปริมาณค่าความจุของการแลกเปลี่ยนประจุบวกเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์เพิ่มขึ้นด้วย ผลอันนี้เป็นความสัมพันธ์ที่เกี่ยวเนื่องกับปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินและปริมาณอนุภาคดินเหนียว ดินที่ศึกษาจัดเป็นดินเหนียวปนร่วน (Clay loam) (บุญเลิศ ศรีสุกใส, 2533) ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความจุของการแลกเปลี่ยนประจุบวกในการวิจัยครั้งนี้คือปริมาณอินทรีย์

วัตถุที่ถูกปลดปล่อยจากกระบวนการย่อยสลายและประจุบวกต่าง ๆ ที่ถูกชะล้างสู่ดินในช่วงเดือนแรกของการย่อยสลาย ซึ่ง Mason และ Bryant (1975) พบว่าโซเดียม 40% โปตัสเซี่ยม 70% และแมกนีเซียม 65% ที่ถูกชะล้างในเดือนแรกของการย่อยสลาย นอกจากนี้ในกระบวนการเปลี่ยนแปลงเป็นแร่ธาตุอาหาร ขณะเกิดการย่อยสลาย ธาตุอาหารที่ถูกเปลี่ยนส่วนใหญ่ที่อยู่ในรูปประจุบวก (K^+, Ca^{++}, Mg^{++}, Na^+) ในขณะที่เกิดการย่อยสลายที่มีการเพิ่มขึ้นของอินทรีย์วัตถุ ซึ่งเป็นตัวหลักที่มีผลโดยตรงต่อการเพิ่มค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (ปัทมา วิตยากร, 2534) และรวมถึงประจุบวกต่าง ๆ ที่ถูกชะล้างจากเศษซากใบไม้สู่ดิน ดังนั้นจึงมีผลเกี่ยวเนื่องต่อการเพิ่มของปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน

5.1.4 ระยะเวลาที่ทำให้ย่อยสลายได้ครึ่งหนึ่ง

ระยะเวลาที่ทำให้การย่อยสลายได้ครึ่งหนึ่งมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน ($r = 0.63$) หมายความว่าเมื่อระยะเวลาที่ทำให้การย่อยสลายได้ครึ่งหนึ่งสูงขึ้นมีผลทำให้ปริมาณของฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์เพิ่มสูงขึ้นด้วย อันมีผลต่อเนื่องมาจากค่าคงที่ของการย่อยสลายเอ็กโพแนนเชียล นั่นคือจากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์กับค่าคงที่ของการย่อยสลายเอ็กโพแนนเชียลมีความสัมพันธ์กันในเชิงลบ ดังนั้นเมื่อค่าคงที่ของการย่อยสลายลดลง ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์เพิ่มขึ้น เมื่อค่าคงที่ของการย่อยสลายเอ็กโพแนนเชียลในแต่ละช่วงเวลาลดลงมีผลทำให้ระยะเวลาที่ทำให้การย่อยสลายได้ครึ่งหนึ่งเพิ่มขึ้น ซึ่งอธิบายได้จากสูตรต่อไปนี้

$$X_t / X_o = e^{-kt} \qquad (kt = \ln 1/2)$$

$$t_{1/2} = \frac{.6931}{k}$$

ในระยะเริ่มต้นของการย่อยสลายค่าคงที่ของการย่อยสลายสูง เชื่อว่าเนื่องจากองค์ประกอบที่ย่อยสลายได้ง่ายจะถูกผู้ย่อยสลายเข้าย่อยสลายได้อย่างรวดเร็ว ระยะเวลาที่ทำให้การย่อย

สลายได้ครึ่งหนึ่งต่ำ ในช่วงหลังของการย่อยสลายค่าคงที่ของการย่อยสลายต่ำลง เป็นผลจากเนื้อเยื่อที่ย่อยสลายได้ง่ายถูกย่อยไปหมดแล้ว เหลือส่วนที่ย่อยสลายได้ยาก ผู้ย่อยสลายที่สามารถทำงานได้มีน้อยกลุ่ม ทำให้การย่อยสลายช้า (Swift, 1979) ทำให้ระยะเวลาที่ทำให้การย่อยสลายได้ครึ่งหนึ่งใช้เวลามากขึ้น ดังนั้นในช่วงที่มีการย่อยสลายรวดเร็ว ระยะเวลาที่ทำให้ย่อยสลายได้ครึ่งหนึ่งต่ำ อัตราการปลดปล่อยฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์จะเริ่มถูกปลดปล่อยอย่างช้า ๆ เนื่องจากผลของอินทรียวัตถุ เมื่อการย่อยสลายเกิดขึ้นในช่วงเวลาต่อมาการปลดปล่อยฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์สูงขึ้น

5.1.5 อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน

อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจนมีความสัมพันธ์ในเชิงลบกับปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ($r = -0.50$) นั่นคืออัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจนลดลงมีผลทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์สูงขึ้น ในขณะเกิดการย่อยสลายเกิดขึ้นเกี่ยวข้องกับกิจกรรมการทำงานของผู้ย่อยสลาย ทั้งที่เป็นจุลินทรีย์และพวกสัตว์ในดิน โดยมีคาร์บอนและไนโตรเจนเป็นแหล่งอาหารหลักของผู้ย่อยสลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งแล้วไนโตรเจนซึ่งเป็นองค์ประกอบของโปรตีนในเนื้อเยื่อของสัตว์ในดิน ดังนั้นในขณะเกิดการย่อยสลายผู้ย่อยสลายส่วนใหญ่ทำงานโดยอาศัยการกินเศษซากใบไม้เข้าไปแล้วปล่อยเอนไซม์เปลี่ยนแปลงสารอินทรีย์ให้อยู่ในรูปสารอนินทรีย์ ทำให้อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนลดลงขณะเกิดการย่อยสลาย ค่าคงที่ของการย่อยสลายลดลง (Coleman, 1990) มีผลต่อการเพิ่มการปลดปล่อยฟอสฟอรัสรูปที่เป็นประโยชน์เพิ่มขึ้น

5.1.6 อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส

อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสมีความสัมพันธ์เชิงลบกับปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ($r = -0.57$) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ .001 ส่วนเหตุผลเชิงเดียวกับอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน

5.1.7 ไนโตรเจนรวม

ปริมาณไนโตรเจนรวมมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ($r = 0.51$) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ .001 นั่นคือเมื่อปริมาณไนโตรเจนรวมเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์เพิ่มสูงขึ้น ในขณะเกิดการย่อยสลายของเศษซากใบไม้ ซึ่งมีผู้ย่อยสลายทำหน้าที่สำคัญในกระบวนการย่อยสลาย ทำให้แร่ธาตุอาหารที่ปลดปล่อยจากกระบวนการเปลี่ยนแปลงแร่ธาตุอาหารจากรูปอินทรีย์สารให้เป็นอนินทรีย์สาร คือ คาร์บอน ฟอสฟอรัส ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ (Stevenson, 1986) ดังนั้นขณะเกิดการย่อยสลายเศษซากใบไม้ ทำให้มีการเพิ่มขึ้นของปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในดิน ซึ่งธาตุอาหารที่กล่าวมาข้างต้นล้วนแต่เป็นองค์ประกอบหลักของเศษซากใบไม้ดังได้กล่าวไปแล้วว่า ไนโตรเจนเป็นแหล่งอาหารหลักของผู้ย่อยสลาย ปกติไนโตรเจนก็มีน้อยเช่นกัน แต่กิจกรรมของผู้ย่อยสลายต้องการไนโตรเจน ดังนั้นจากผลการวิจัยเมื่อมีการเพิ่มไนโตรเจนสูงขึ้นตลอดระยะเวลาการย่อยสลาย หมายถึงการเพิ่มกิจกรรมของผู้ย่อยสลายด้วย มีผลทำให้เพิ่มปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์นี้ด้วย

5.1.8 อินทรีย์วัตถุ

ปริมาณอินทรีย์วัตถุมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ นั่นคือเมื่อปริมาณอินทรีย์วัตถุเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์เพิ่มขึ้นด้วย แต่เป็นความสัมพันธ์ที่ค่อนข้างต่ำ ($r = 0.39$) เมื่อเทียบกับปัจจัยอื่น ๆ เนื่องมาจากอินทรีย์วัตถุมีผลทางอ้อมต่อปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ คือจะไปขัดขวางการจับระหว่างฟอสเฟตกับอลูมินั่มโดยอินทรีย์วัตถุจะเข้าไปแย่งจับกับอลูมินั่มรวมตัวเป็นอลูมินั่มคีเลตคอมเพล็กซ์ ทำให้ฟอสเฟตซึ่งเคยถูกจับอยู่กับอลูมินั่มถูกปลดปล่อยออกมา (Borggaard และคณะ, 1990) ทั้งนี้โดย Lee และ Jordan (1990) ได้ให้เหตุผลว่าปฏิกิริยาระหว่างฟอสฟอรัสกับอลูมินั่มมีพันธะที่แข็งแรงน้อยกว่าพันธะระหว่างอลูมินั่มกับกรดอินทรีย์ ดังนั้นเมื่อมีอินทรีย์วัตถุในดินสูง ฟอสฟอรัสที่ถูกจับกับอลูมินั่มจึงถูกแทนที่ ทำให้ฟอสฟอรัสถูกปลดปล่อยออกมาในรูปที่เป็นประโยชน์สูงขึ้น ในขณะเกิดการย่อยสลายเศษซากใบไม้ มีการปลดปล่อยอินทรีย์วัตถุสู่ดินสูงขึ้น จึงมีผลทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสถูกปลดปล่อยออกมามากขึ้น

5.1.9 ดัชนีความหลากหลายทางชีวภาพของสัตว์ในดิน

ดัชนีความหลากหลายทางชีวภาพของสัตว์ในดินมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ($r = .39$) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับสำคัญ .001 นั่นคือเมื่อดัชนีความหลากหลายทางชีวภาพของสัตว์ในดินเพิ่มสูงขึ้น มีผลทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์เพิ่มสูงขึ้นด้วย ทั้งนี้ดัชนีความหลากหลายทางชีวภาพของสัตว์ในดินมีผลต่ออัตราการย่อยสลาย นั่นคือดัชนีความหลากหลายทางชีวภาพของสัตว์ในดินนำไปสู่การเพิ่มอัตราการย่อยสลาย อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่ำ (Coleman, 1990) ทำให้ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินเพิ่มขึ้นมีผลทางอ้อมทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์เพิ่มสูงขึ้นด้วย

5.1.10 คาร์บอน

ปริมาณคาร์บอนมีความสัมพันธ์เชิงลบกับปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ($r = -0.25$) นั่นคือ เมื่อปริมาณคาร์บอนลดลงมีผลทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์สูงขึ้น ในขณะเกิดการย่อยสลายเศษซากใบไม้ปริมาณคาร์บอนซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของเศษซากใบไม้จะลดลง เนื่องจากถูกเปลี่ยนรูปให้อยู่ในรูปของอินทรีย์สารอื่น ๆ (Ross, 1989) ในขณะเดียวกับปริมาณอินทรีย์วัตถุเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์เพิ่มสูงขึ้นด้วย

5.1.11 ฟอสฟอรัสรวม

ฟอสฟอรัสรวมมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ($r = 0.15$) จากการวิจัยครั้งนี้เมื่อมีการเพิ่มอินทรีย์วัตถุให้กับดิน แล้วเริ่มเกิดกระบวนการย่อยสลาย พบว่าในช่วง 2 เดือนแรกของการย่อยสลาย ปริมาณฟอสฟอรัสรวมเพิ่มสูงขึ้นมาก ทั้งนี้เนื่องจากมีการเพิ่มแหล่งฟอสฟอรัสให้กับดิน ทั้งส่วนที่เป็นอินทรีย์ฟอสฟอรัสและอนินทรีย์ฟอสฟอรัส ในขณะที่ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ซึ่งเป็นอนินทรีย์ฟอสฟอรัสต่ำ ทั้งนี้เข้าใจว่าฟอสฟอรัสส่วนใหญ่ในช่วงนี้อยู่ในรูปอินทรีย์ฟอสฟอรัส ซึ่ง Odum (1983) แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า ฟอสฟอรัสในเขตร้อนส่วนใหญ่สะสมอยู่ในมวลชีวภาพ ดังนั้นเมื่อเพิ่มมวลชีวภาพให้กับดินจึงเป็นการเพิ่มฟอสฟอรัสในดินด้วย จากการวิจัยครั้งนี้ต้องการเปรียบเทียบให้เห็นแนวโน้มของปริมาณฟอสฟอรัสรวมและปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ที่เปลี่ยนแปลงไปในขณะเกิดการย่อย

สลาย ซึ่งเป็นกระบวนการธรรมชาติที่เกิดขึ้นเสมอในระบบนิเวศต่าง ๆ เพื่อรักษาดุลย์ของธาตุอาหารในดิน พบว่าโดยรวมแล้วฟอสฟอรัสรวมจะสูงกว่าปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ซึ่งพิสูจน์ทฤษฎีการหมุนเวียนของฟอสฟอรัสในดินในเขตร้อนว่า ฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์สามารถทำให้เพิ่มขึ้นในดินได้ โดยกระบวนการย่อยสลายเศษซากใบไม้ โดยผ่านกระบวนการเปลี่ยนแปลงอินทรีย์สารให้อยู่ในรูปอนินทรีย์สารโดยผ่านผู้ย่อยสลายคือสิ่งมีชีวิตในดินที่มีความสลับซับซ้อนเป็นตัวทำงานหลัก และโดยกลไกการเกิดคีเลชั่น (Jordan, 1985)

5.1.12 ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง

ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน ($r = .14$) นั่นคือเมื่อค่าความเป็นกรดเป็นด่างเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินเพิ่มขึ้น โดยกลไกการเปลี่ยนแปลง ซึ่ง Brady (1984) สรุปให้เห็นว่าที่ค่าความเป็นกรดเป็นด่างต่าง ๆ มีผลต่อความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสต่าง ๆ กัน โดยที่ค่าความเป็นกรดเป็นด่างต่ำ ดินเป็นกรด ทำให้ปริมาณอลูมินั่มอิออนซึ่งเป็นประจุบวกที่มีสมบัติเป็นกรดละลายออกมาได้สูง ทำให้ฟอสฟอรัสถูกดูดซับด้วยอลูมินั่ม ส่งผลให้ฟอสฟอรัสรูปที่เป็นประโยชน์ต่ำ เมื่อค่าความเป็นกรดเป็นด่างสูงกว่า 5 ปริมาณอลูมินั่มที่ละลายได้น้อยลง ฟอสฟอรัสจึงถูกดูดซับน้อยลงด้วย จึงทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสรูปที่เป็นประโยชน์เพิ่มสูงขึ้น

5.1.13 ค่าคงที่ของการย่อยสลายเอ็กโนแนนเชียล

ค่าคงที่ของการย่อยสลายเอ็กโนแนนเชียลมีความสัมพันธ์เชิงลบกับปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ($r = .08$) นั่นคือเมื่อค่าคงที่ของการย่อยสลายเอ็กโนแนนเชียลลดลงมีผลทำให้ค่าปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์เพิ่มสูงขึ้น โดยเป็นผลทางอ้อมกันคือ ค่าคงที่ของการย่อยสลายเศษซากใบไม้ที่ลดลงมีผลต่อการเพิ่มปริมาณอินทรีย์วัตถุให้กับดิน ซึ่งจะมีผลทางอ้อมต่อปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์อีกต่อหนึ่ง

5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่อความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัส

จากการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ พบว่าปัจจัยต่าง ๆ ที่สามารถพยากรณ์ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในภาพรวม ซึ่งถูกคัดเข้าสมการการถดถอยพหุคูณ โดยใช้วิธี Stepwise regression ปรากฏว่าปัจจัยที่ถูกคัดเข้าสมการการถดถอยพหุคูณอันดับแรก คือ อลูมินั่ม ซึ่งเป็นปัจจัยที่สามารถพยากรณ์ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ได้สูงสุด ส่วนปัจจัยรองเรียงตามลำดับ คือ ค่าความจุการแลกเปลี่ยนประจุบวก ปริมาณฟอสฟอรัสรวม อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส ระยะเวลาที่ทำให้ย่อยสลายได้ครึ่งหนึ่ง ปริมาณไนโตรเจนรวม และค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดิน ซึ่งปัจจัยทั้งหมดนี้เมื่อแทนค่าในสมการการถดถอยพหุคูณ แล้วสามารถพยากรณ์ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ได้ 69 เปอร์เซ็นต์ (r^2 = .69) ดังสมการ

avai.P = .2585 - .279Al + .3CEC - .87TotalP - .135 C:N:P + 1.97t.5 + 1.567N + .543pH + 1.05

($Y = b_o + b_1x_1 ..... b_nx_n + e$)

เมื่อ y = ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์

b_o = ค่าคงที่ของสมการการถดถอย

e = ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard error)

แต่ในแต่ละชุดเศษซากใบไม้ที่ทดลองปัจจัยต่าง ๆ ดังกล่าวนั้นมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสไม่เท่ากัน ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณของปัจจัยที่มีผลต่อความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัส

5.3 กลไกที่มีผลต่อความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัส

กลไกสำคัญที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงฟอสฟอรัสจากการวิจัยครั้งนี้น่าจะมาจาก 2 กลไกหลัก คือ

1. กลไกการเกิดคีเลชั่นของอินทรีย์วัตถุกับอลูมินั่ม ทำให้ลดการดูดซับฟอสฟอรัสในดินลง ทำให้ฟอสฟอรัสอยู่ในรูปที่ละลายได้สูงขึ้น

2. กลไกที่เกิดจากกระบวนการเปลี่ยนแปลงอินทรีย์สารให้อยู่ในรูปอนินทรีย์สาร โดยบทบาทของผู้ย่อยสลายเศษซากใบไม้ ขณะเกิดกระบวนการย่อยสลาย

5.3.1 กลไกการเกิดคีเลชั่น (Chelation)

จากการวิจัยครั้งนี้พบว่าปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงฟอสฟอรัสในดิน คือ อลูมินั่ม โดยที่อลูมินั่มมีความสัมพันธ์เชิงลบต่อปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ในขณะที่ปริมาณอลูมินั่มลดลงในระหว่างกระบวนการย่อยสลายเศษซากใบไม้ นั่นเชื่อว่ามีผลมาจากการปลดปล่อยอินทรีย์วัตถุจากกระบวนการย่อยสลาย โดยอินทรีย์วัตถุจะทำหน้าที่เป็นตัวแย่งจับ (Chelate) กับปริมาณอลูมินั่มในดินรวมตัวเป็นอลูมินั่มคีเลตคอมเพล็กซ์ ทำให้ฟอสฟอรัสซึ่งเดิมเคยจับกับอลูมินั่มถูกปลดปล่อยออกมาในรูปที่สามารถละลายน้ำได้เป็นรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชได้ ดังสมการ (Sibanda และ Young, 1980)

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

จากสมการดังกล่าว Lopez-Hernandez และ Burnham (1974); Lee และ Jordan (1990) ได้ทดลองและให้ผลสนับสนุนว่าในดินที่มีระดับของสารประกอบคาร์บอนสูงทำให้การดูดซับฟอสฟอรัสน้อย เหตุผลเกี่ยวกับระดับการแลกเปลี่ยนอลูมินั่มในดินนั้น เชื่อว่าปฏิกิริยาระหว่างฟอสฟอรัสกับอลูมินั่มมีพันธะที่แข็งแรงน้อยลง พันธะระหว่างโลหะ (อลูมินั่ม, เหล็ก) กับกรดอินทรีย์ เมื่ออินทรีย์วัตถุในดินสูงฟอสฟอรัสที่ถูกดูดซับน้อยลงจึงทำให้ฟอสฟอรัสรูปที่เป็นประโยชน์ถูกปลดปล่อยลงไปในสารละลายดินสูงขึ้น อย่างไรก็ตามจากผลการวิจัยของ

Borggard และคณะ (1990) พบว่าอินทรีย์วัตถุมีผลทางอ้อมต่อการดูดตรึงฟอสเฟตโดยไปขัดขวางการรวมตัวของฟอสเฟตกับอลูมินั่มออกไซด์ โดยที่ความสามารถในการดูดซับฟอสเฟตเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณอลูมินั่มและเหล็ก โดยไม่คำนึงถึงปริมาณอินทรีย์วัตถุ ซึ่งเชื่อว่าน่าจะสนับสนุนงานวิจัยครั้งนี้

5.3.2 <u>กลไกที่เกิดจากกระบวนการเปลี่ยนแปลงอินทรีย์ให้อยู่ในรูปอนินทรีย์สาร</u>

ในขณะเกิดการย่อยสลายเศษซากใบไม้ต่าง ๆ โดยผ่านบทบาทของผู้ย่อยสลายเศษซากใบไม้ ซึ่งอาศัยกลไกทางชีวเคมี โดยที่ผู้ย่อยสลายปล่อยเอนไซม์ภายในเซลล์ออกมาเพื่อทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงอินทรีย์สารให้มาอยู่ในรูปอนินทรีย์สาร (Haynes, 1986)

อินทรีย์วัตถุ + O_2 —(ผู้ย่อยสลายเศษซากใบไม้)→ ก๊าซ (CO_2, NH_3); น้ำ (H_2O); อิออนบวก (K^+, Ca^{2+}, Fe^{2+}); อิออนลบ (NO_3, SO_4, PO_4,)

จะเห็นว่าจากสมการโดยมีผู้ย่อยสลายในที่นี้น่าจะเป็นบทบาทของจุลินทรีย์ ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนสารอินทรีย์จากอินทรีย์วัตถุ โดยการออกซิเดชั่น ทำให้เกิดฟอสเฟตอิออน ซึ่งเป็นรูปของฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ได้

5.4 <u>องค์ประกอบเศษซากใบไม้กับความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัส</u>

เศษซากใบไม้ที่มีความหลากหลายมีผลต่อปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสและเกี่ยวข้องกับกลไกการเปลี่ยนแปลงฟอสฟอรัสดังนี้

การย่อยสลาย คือ การสูญหายไปของมวลของเศษซากใบไม้ ดังนั้นน้ำหนักที่หายไปจึงเป็นปัจจัยหลักที่นำมาพิจารณาจากการวิจัยครั้งนี้ พบว่าน้ำหนักเศษซากใบไม้ที่หายไปในช่วงเวลาต่าง ๆ สังเกตว่าเศษซากใบไม้ชนิดเดียว ซึ่งได้แก่ สัก ซ้อ มะขาม ขนุน และมะม่วงหิมพานต์ พบว่าเศษซากใบไม้ของซ้อ มีน้ำหนักที่หายไปสูงที่สุดในทุกช่วงเวลา (ซ้อ < สัก < มะม่วงหิมพานต์ < มะขาม < ขนุน) ส่วนเศษซากใบไม้ที่ประกอบด้วย 2 ชนิด น้ำหนัก

เศษซากใบไม้ที่หายไปสูงที่สุด คือ ชุดที่มีซ้อเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย ชี้ให้เห็นว่า ซ้อเป็นไม้โตเร็ว ส่วนประกอบต่าง ๆ ของใบจึงน่าประกอบด้วยเนื้อเยื่อที่ไม่แข็งและซับซ้อนมาก ทำให้กระบวนการย่อยสลายเกิดขึ้นได้เร็ว เชื่อว่ามีองค์ประกอบที่เป็นลิกนินน้อย (Swift, 1979) ซึ่งค่าน้ำหนักที่หายไปจะเป็นดัชนีบ่งชี้ถึงค่าคงที่ของการย่อยสลายเอ็กโนแนนเชียล (k) ซึ่งสัมพันธ์กับน้ำหนักที่หายไป เพราะฉะนั้นค่าคงที่ของการย่อยสลายเอ็กโพแนนเชียลที่ได้ย่อมสัมพันธ์กับน้ำหนักเศษซากใบไม้ที่หายไป นั่นคือ ในกลุ่มเศษซากใบไม้ชนิดเดียว ซ้อ ยังมีค่าคงที่ของการย่อยสลายเอ็กโพแนนเชียลสูงสุด ในกลุ่มเศษซากใบไม้ 2 ชนิด กลุ่มเศษซากใบไม้ที่มีซ้อเป็นองค์ประกอบร่วมอยู่ด้วยจะเป็นกลุ่มเศษซากใบไม้ที่มีค่าคงที่ของการย่อยสลายค่อนข้างสูง นอกจากนี้ยังสัมพันธ์กับระยะเวลาที่ทำให้การย่อยสลายไปได้ครึ่งหนึ่งน้อยที่สุด (ซ้อ < สัก < มะม่วงหิมพานต์ < มะขาม < ขนุน) นั่นคืออัตราการย่อยสลายสูงที่สุด ซึ่งจากการวิจัยครั้งนี้ พบว่าซ้อจะใช้เวลาในการย่อยสลายประมาณ 102 วัน สักจะใช้เวลาในการย่อยสลายประมาณ 146 วัน มะม่วงหิมพานต์จะใช้เวลาในการย่อยสลายประมาณ 204 วัน มะขามจะใช้เวลาในการย่อยสลายประมาณ 277 วัน และขนุนจะใช้เวลาในการย่อยสลายประมาณ 350 วัน เมื่อพิจารณาเวลาที่ใช้ในการย่อยสลายของเศษซากใบไม้ของพืชต่าง ๆ ที่ศึกษาทั้ง 5 ชนิด น่าจะเหมาะสมที่สุดที่จะเลือกเข้ามาปลูกในระบบวนเกษตร ซึ่งสอดคล้องกับหลักการพื้นฐานเกี่ยวกับการเลือกชนิดพืชมาปลูกในระบบวนเกษตร ซึ่งใช้ระยะเวลาและอัตราการย่อยสลายเศษซากใบไม้เป็นเกณฑ์ โดยเลือกชนิดพืชที่มีระยะเวลาในการย่อยสลายต่างกัน ทั้งนี้เพื่อจะได้ปลดปล่อยแร่ธาตุอาหารให้แก่ดินได้ตลอดเวลา (Young, 1987)

ดังได้กล่าวมาแล้วว่าเศษซากใบไม้ทั้ง 5 ชนิด ที่ทำการศึกษาการย่อยสลายใช้ระยะเวลาในการย่อยสลายไม่เท่ากัน ขณะเกิดการย่อยสลายซึ่งจะมีการปลดปล่อยอินทรีย์สารออกมาได้ในช่วงเวลาที่ไม่เท่ากัน ดังนั้นเมื่อรวมเศษซากใบไม้ที่มีองค์ประกอบตั้งแต่ 2 ชนิด, 3 ชนิด และ 4 ชนิด เข้าด้วยกัน เนื่องจากอัตราการย่อยสลายที่ไม่เท่ากัน ระยะเวลาที่ใช้ในการย่อยสลายไม่เท่ากัน ผลที่ได้จากการย่อยสลาย คือ อินทรีย์สารจะถูกปลดปล่อยออกมาตลอดเวลา เพราะฉะนั้นยิ่งเศษซากใบไม้ที่มีความหลากหลายด้วยช่วงระยะเวลาของการย่อยสลายแล้ว อินทรีย์วัตถุจะปลดปล่อยออกมาตลอดเวลา ทำให้โอกาสที่อลูมินั่มในดินสะสมอยู่น้อยปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์จะถูกปลดปล่อยออกมาตลอดเวลา ทั้งด้วยกลไกคีเลชั่นและกลไกจาก

กระบวนการเปลี่ยนแปลงสารอินทรีย์ให้เป็นสารอนินทรีย์ เพราะฉะนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าการย่อยสลายเศษซากใบไม้ที่มีความหลากหลายน่าจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินได้ดีกว่าเศษซากใบไม้ชนิดเดียว ในกรณีที่เศษซากใบไม้แต่ละชนิดมีระยะเวลาการย่อยสลายไม่เท่ากัน ทั้งนี้เพราะในกรณีเศษซากใบไม้ชนิดเดียวเมื่อเกิดการย่อยสลายแล้วการปลดปล่อยอินทรีย์วัตถุจะเกิดขึ้นเป็นช่วง ๆ โอกาสที่ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์จะถูกปลดปล่อยออกมาขาดช่วงไม่สม่ำเสมอ ซึ่งจะมีผลต่อผลผลิตของระบบนิเวศนั้น ๆ ทำให้อัตราการเจริญเติบโตไม่ต่อเนื่อง