

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตอนที่ 1 เอกสารที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาแบ่งออกเป็น 2 หัวข้อ ได้แก่

1. ไคโตซานกับการเป็นสารเร่งการเจริญเติบโตของพืช

1.1 การประยุกต์ใช้ไคโตซานเพื่อเป็นสารเร่งการเจริญเติบโตของพืช

1.2 การศึกษาการเจริญเติบโตของพืช โดยการศึกษาประสิทธิภาพของการใช้ธาตุ

อาหารฟอสฟอรัสในดิน

1.3 การตรึงฟอสฟอรัสในดิน

1.4 การสูญเสียฟอสฟอรัสจากดิน

2. คำนวณที่ใช้บ่งชี้การเร่งการเจริญเติบโตของพืชของไคโตซาน

2.1 การตอบสนองของพืชต่อไคโตซาน

2.2 การแลกเปลี่ยนไอโซโทปโดยใช้สารกัมมันตรังสีฟอสฟอรัส (Isotopically Exchangeable Phosphate, E-Value)

2.3 การวัดค่าความเป็นประโยชน์ของปุ๋ยฟอสเฟตต่อพืช (% Fertilizer P Utilization, % FPU) โดยใช้เทคนิคทางนิวเคลียร์ของสารกัมมันตรังสีฟอสฟอรัส

2.4 วิธีการวัดความแรงรังสีของฟอสฟอรัส-32 ในสารละลายสกัดดินและพืช

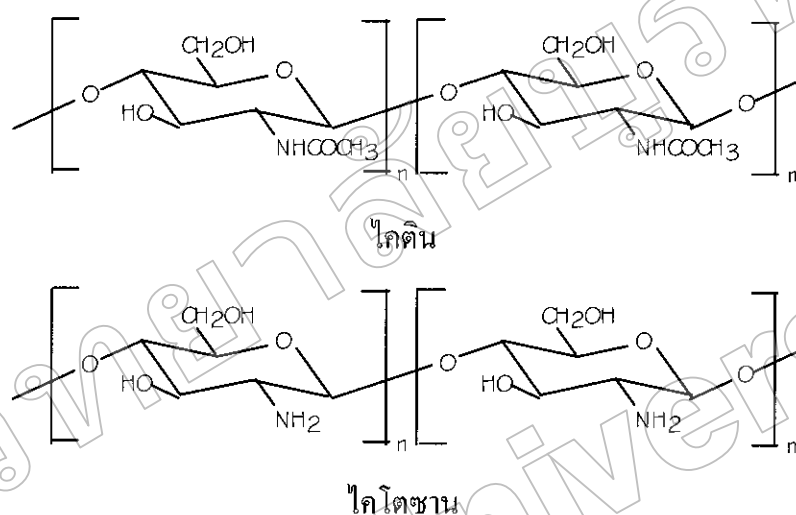
ตอนที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ไคโตซานกับการเป็นสารเร่งการเจริญเติบโตของพืช

1. การประยุกต์ใช้ไคโตซานเพื่อเป็นสารเร่งการเจริญเติบโตของพืช

ไคโตซานเป็นอนุพันธ์ของไคตินที่ได้จากปฏิกิริยา Deacetylation ของไคติน บางครั้งอาจเรียกไคโตซานว่า Deacetylated Chitin เนื่องจากหมู่ Acetyl ($-\text{CO}-\text{CH}_3$) ของไคตินถูกตัดออกเหลือเป็นหมู่ Amino ($-\text{NH}_2$) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่สอง ซึ่งโดยทั่วไปถ้าหมู่ Acetyl ถูกตัดหรือหลุดไปประมาณร้อยละ 60 ไคตินจะถูกเรียกว่าไคโตซาน และถ้าหมู่ Acetyl ถูกตัดหรือหลุดไปประมาณร้อยละ 90-100 จะเรียกว่า Fully Deacetylated Chitosan (Muzzarelli, 1985) ชื่อทางเคมีของไคโตซานคือ Poly β -(1 $\rightarrow$ 4)-2-Amino-2-Deoxy-D-Glucose มีสูตรทั่วไปเป็น $(\text{C}_6\text{H}_{11}\text{NO}_4)_n$ (รัตเกล้า ภูติวรนาถ, 2539) ประกอบด้วยคาร์บอนร้อยละ 44.7 ไฮโดรเจนร้อยละ 6.8 และไนโตรเจนร้อยละ 8.7 โดยน้ำหนัก (Muzzarelli, 1977) โดยทั่วไปไคโตซานจะมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง

1×10^5 ถึง 1.2×10^6 (ภาวดี เมระกานนท์ และคณะ, 2543) สำหรับสมบัติของไคโตซานที่แตกต่างจาก โพลีแซคคาไรด์ หรือสารไฮโดรคอลลอยด์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงอื่น ๆ คือ ไคโตซานมีสมบัติเป็น Cationic Polyelectrolyte เนื่องจากไคโตซานมีหมู่ Amino ($-\text{NH}_2$) ที่ตำแหน่งคาร์บอนตัวที่สอง ดังกล่าว (เขาวภา ไหวพริบ, 2534) สูตรโครงสร้างทางเคมีของไคตินและไคโตซานแสดงดังภาพที่ 2-1



ภาพที่ 2-1 โครงสร้างทางเคมีของไคตินและไคโตซาน

ไคโตซานก็เช่นเดียวกับโพลีเมอร์หรือโพลีแซคคาไรด์อื่นทั่วไป คือ เมื่อเกิดการตัดสายโซ่โพลีเมอร์จะให้สายโซ่โมเลกุลที่สั้นลงเป็นโอลิโกเมอร์ (Oligomer) หรือโอลิโกแซคคาไรด์ (Oligosaccharide) และเป็นหน่วยย่อยที่เล็กที่สุดเรียกว่า โมโนเมอร์ (Monomer) หรือโมโนแซคคาไรด์ (Monosaccharide) โดยโอลิโกเมอร์หรือโอลิโกแซคคาไรด์ของไคโตซาน คือ Chitooligosaccharides ส่วน โมโนเมอร์หรือโมโนแซคคาไรด์ของไคโตซาน คือ D-Glucosamine ตามลำดับ (ภาวดี เมระกานนท์ และคณะ, 2543) สำหรับกระบวนการทำให้เกิดการตัดสายโซ่โพลีเมอร์ของไคโตซานมีอยู่หลายวิธี แต่การตัดสายโซ่โพลีเมอร์ของไคโตซานเนื่องจากรังสี เป็นกระบวนการที่ปัจจุบันหลายประเทศกำลังให้ความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ทั้งนี้เนื่องจากวิธีการใช้รังสีสามารถนำมาใช้ในการตัดสายโซ่โพลีเมอร์ของไคโตซานได้ในปริมาณมาก ๆ ประกอบกับมีขั้นตอนที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อนเมื่อเทียบกับวิธีอื่น รวมถึงยังช่วยลดปริมาณการใช้สารเคมีและระยะเวลาในกระบวนการผลิตได้ (Bahari, Hussein, Hashim, & Dahlan, 2002; Chirachanchai & Yoksan, 2002; Choi, Park, & Park, 2002) โดยเฉพาะประเทศที่มีแหล่งของโพลีเมอร์ธรรมชาติที่มาจากผลผลิตทางการเกษตรหรือผลิตผลทางการเกษตร อันได้แก่ น้ำยางพารา เส้นใยธรรมชาติ

สาหร่าย และของเหลือจากอาหารทะเล ได้แก่ เปลือกกุ้ง ปู และปลาหมึก ซึ่งโพลิเมอร์ธรรมชาติเหล่านี้สามารถนำมาพัฒนาใช้ประโยชน์ได้เช่นเดียวกับโพลิเมอร์สังเคราะห์ โดยแนวคิดและการพัฒนาดังกล่าวเป็นผลมาจากการประชุมของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (International Atomic Energy Agency, IAEA) กับสมาชิกของประเทศระดับภูมิภาคเอเชียที่เมือง Mumbai ประเทศอินเดีย ซึ่งจัดขึ้นระหว่างวันที่ 6-8 ธันวาคม พ.ศ. 2541 โดยมีเนื้อหาของการประชุมเกี่ยวข้องกับการริเริ่มโครงการวิจัยในการนำโพลิเมอร์ธรรมชาติซึ่งรวมถึงไคโตซานมาผ่านกระบวนการฉายรังสี เพื่อปรับเปลี่ยนคุณสมบัติให้เหมาะกับการนำไปประยุกต์ใช้งานในสาขาต่าง ๆ (International Atomic Energy Agency, 2002a; 2002b)

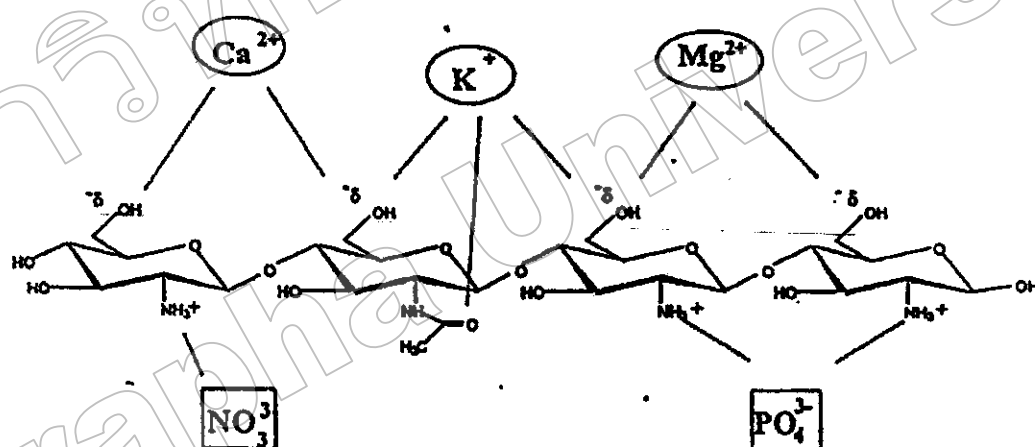
สำหรับประเทศไทยได้มีการศึกษาผลของการใช้รังสีแกมมาในการตัดสายโพลิเมอร์ของไคโตซาน เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ทางด้านการเกษตรเป็นส่วนใหญ่ โดยได้นำมาใช้ในการปรับปรุงสภาพของดิน (Chandrkrachang, 2002) รวมถึงการนำมาใช้เป็นสารเร่งการเจริญเติบโตในพืช ซึ่งที่ผ่านมาได้มีการศึกษาในพืช ผัก และผลไม้หลายชนิด (Chandrkrachang, 2002; International Atomic Energy Agency, 2002a, 2002b)

การนำไคโตซานมาใช้เป็นสารเร่งการเจริญเติบโตของพืช ไคโตซานถูกใช้เป็นสารเร่งการเจริญเติบโตในสารปกป้องต้นไม้มที่ประกอบด้วย Carbon Black เป็นองค์ประกอบหลัก และ Fixing Component ที่ประกอบด้วย Animal Glue และน้ำ สารปกป้องนี้จะเกิดเป็นชั้นที่สามารถกั้นน้ำ ป้องกันการผุกร่อนของพื้นผิวส่วนที่เสียหายของพืช จากเชื้อราหรือการกัดเซาะของน้ำฝน ไคโตซานยังให้ผลเช่นเดียวกับฮอร์โมนเร่งราก ใช้กระตุ้นการงอกรากของกิ่งชำ ไม้ดอกและไม้ประดับชนิดต่าง ๆ โดยนำส่วนของพืชที่ต้องการชำแช่ในสารละลายเจือจางของไคโตซานประมาณ 2 ชั่วโมง ก่อนนำไปปักชำในวัสดุเพาะชำ (ภาวดี เมธะคานนท์ และคณะ, 2543) นอกจากนี้ในการใช้ไคโตซานร่วมกับการเพาะปลูกข้าว พบว่า ทำให้ความยาวของต้นข้าวและผลผลิตเพิ่มขึ้น 20-30 % (Stevens, 1996) และจากการศึกษาสมบัติของไคโตซานในการเป็นสารเร่งการเจริญเติบโตในพืชอีกหลาย ๆ ชนิด ไม่ว่าจะเป็นแคโรท สตรอเบอร์รี่ ถั่วเหลือง หรือ *L. Latifolium* ก็ให้ผลการศึกษาที่เป็นไปในทำนองเดียวกันกับข้อมูลข้างต้น (Lang, Luan, Hai, & Hien, 2002; Luan et al., 2002)

แนวทางหนึ่งที่ใช้ในการอธิบายถึงการที่ไคโตซานสามารถกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืชได้ คือ พฤติกรรมของไคโตซานที่มีผลเกี่ยวกับยีนของพืชและเชื้อราที่ก่อให้เกิดอันตรายกับพืช นั้น โดยเชื้อราที่มาทำอันตรายกับพืชถูกระงับด้วยผลพวงจากการที่พืชนั้นสร้างสารที่ป้องกันตัวเองได้ ซึ่งเรียกว่า Elicitor โดยมีกลไกดังนี้ เมื่อพืชที่เป็นเจ้าบ้าน (Host) ได้รับการฉีดยาด้วยไคโตซานที่มีขนาดพอเหมาะที่ซึมผ่านเข้าสู่เซลล์พืช ย่อมนำไปก่อให้เกิดอิทธิพลต่อการกระตุ้น DNA ของพืช

นั้น ทำให้มีการกระตุ้นการสร้าง mRNA จากยีนที่ถูกกระตุ้นนั้น ให้มีการผลิตโปรตีนซึ่งไปเพิ่ม Activity ของ Phenylpropanoid Pathway ทำให้มีการผลิตสารพวก Phytoalexins เพิ่มขึ้น ทำให้เพิ่มความต้านทานของตนเองได้มากขึ้น โดยการเพิ่มการสังเคราะห์พวก Endo- β -Glucanase และ Endochitinase ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่สามารถย่อยสลายผนังเซลล์ของเชื้อราที่เป็น Pathogen ของพืชเหล่านั้นได้ โดยทำให้พืชนั้นมีความสามารถในการป้องกันตัวเองได้ขึ้นหนึ่งด้วยการสร้าง Resistance Response ซึ่งเป็น Elicitor ของพืชนั่นเอง (สุวดี จันทร์กระจำว, 2546)

คุณสมบัติอีกประการที่สำคัญ คือ ความสามารถของไคโตซานในการจับกับไอออนต่าง ๆ เช่น โปตัสเซียม, แคลเซียม, แมกนีเซียม, เหล็ก, ฟอสเฟต และ ไนเตรต ที่เป็นประโยชน์กับพืช แล้วค่อย ๆ ปลดปล่อยธาตุอาหารเหล่านี้แก่พืช เพราะไคโตซานเป็นไบโอโพลิเมอร์ที่มีประจุ (รัฐ พิชญางกูร, 2543) ซึ่งจากปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้นล้วนมีผลร่วมกันในการช่วยเร่งการเจริญเติบโตของพืชทั้งสิ้น ภาพที่ 2-2 แสดงไอออนต่าง ๆ ที่มีแนวโน้มว่าจะสามารถจับกับไคโตซาน



ภาพที่ 2-2 ไอออนต่าง ๆ ที่มีแนวโน้มว่าจะสามารถจับกับไคโตซาน (รัฐ พิชญางกูร, 2543)

2. การศึกษาการเจริญเติบโตของพืช โดยการศึกษาประสิทธิภาพของการใช้ธาตุอาหารฟอสฟอรัสในดิน

โดยทั่วไปเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างธาตุอาหารในดินกับพืช จะพบว่าการเจริญเติบโตของพืชจะเกิดได้ดี ก็ต่อเมื่อดินสามารถให้ธาตุอาหารทุกธาตุแก่พืชอย่างเพียงพอ โดยที่ความเป็นประโยชน์ของธาตุนั้น ๆ ในดินจะต้องเหมาะสมแก่การเจริญเติบโตของพืช ซึ่งกระบวนการดังกล่าวเริ่มจากการปลดปล่อยไอออนของธาตุอาหารต่าง ๆ จากส่วนที่เป็นของแข็งออกสู่สารละลายดิน (Soil Solution) ในอัตราที่มากพอ แล้วไอออนเหล่านั้นมาสู่ผิวรากพืช

จนกระทั่งรากพืชดูดไปใช้ประโยชน์ได้ (ยงยุทธ โอสดสภา, ศุภมาส พนิชศักดิ์พัฒนา, อรรถศิษฐ์ วงศ์มณีโรจน์ และชัยสิทธิ์ ทองจู, 2541)

ฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารหลักธาตุหนึ่งที่มีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช ดินโดยทั่วไปมีปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดค่อนข้างต่ำ โดยเฉลี่ยแล้วมีประมาณ 0.06 % ซึ่งต่ำกว่าค่าเฉลี่ยของไนโตรเจนและโพแทสเซียม ทั้งนี้ปริมาณของฟอสฟอรัสในดิน ในแต่ละจุดบนพื้นที่หรือตามหน้าตัดดินจะแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุต้นกำเนิดดิน ความมากน้อยของการชะล้าง และการใช้ที่ดิน (ยงยุทธ โอสดสภา และคณะ, 2541) ฟอสฟอรัสในดินส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปออร์โทฟอสเฟต หรือพวกที่เป็นอนุพันธ์ของกรดออร์โทฟอสฟอริก (H_3PO_4) อำนาจ สุวรรณฤทธิ์ (2525) ได้แบ่งฟอสเฟตในดินออกเป็น 2 พวกใหญ่ ๆ ได้แก่ อินทรีย์ฟอสเฟต ซึ่งส่วนใหญ่เป็นกรดนิวคลีอิก อินโนซิทอลฟอสเฟต และฟอสโฟไลปิด กับอนินทรีย์ฟอสเฟต ซึ่งมีทั้งพวกที่เป็นไอออนฟอสเฟตในสารละลายดิน (Soil Solution) และพวกที่เป็นสารประกอบหรือแร่ที่เป็นของแข็งอยู่ในดิน สำหรับในดินโดยทั่ว ๆ ไปจะมีฟอสเฟตทั้งสองส่วนนี้ต่างกัน โดยพวกอินทรีย์ฟอสเฟตมีแนวโน้มที่มีมากหรือน้อยตามปริมาณของอินทรีย์วัตถุในดิน

สารประกอบอินทรีย์ฟอสเฟตจะเป็นประโยชน์ต่อพืชหลังจากที่มีการย่อยสลายของพวกอินทรีย์วัตถุนั้นเป็นไอออนฟอสเฟตเสียก่อน ซึ่งในดินที่ทำการเกษตรกรรมทั่ว ๆ ไปนั้น ปริมาณฟอสเฟตที่เป็นประโยชน์ต่อพืชจากขบวนการเปลี่ยนอินทรีย์ฟอสเฟตเป็นอนินทรีย์ฟอสเฟตให้พืชใช้ต่อปีนั้นมีน้อยมาก ส่วนสารประกอบอนินทรีย์ฟอสเฟตที่มีอยู่ในดินนั้น พืชสามารถดูดไปใช้ได้ดีกว่า ซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในรูป Monobasic Orthophosphate ($H_2PO_4^-$) และ Dibasic Orthophosphate (HPO_4^{2-}) (ยงยุทธ โอสดสภา และคณะ, 2541) และถ้าจะเปรียบเทียบอนินทรีย์ฟอสเฟตทั้งสองรูปนี้พบว่า พืชสามารถดูดใช้อนุมูล $H_2PO_4^-$ ได้ดีกว่าอนุมูล HPO_4^{2-} ถึง 10 เท่าตัว (Tisdale & Nelson, 1975 อ้างถึงใน มีศักดิ์ มลิณทวิสมัย, 2537, หน้า 5) อย่างไรก็ตาม การดูดใช้อนุมูลฟอสเฟตจะขึ้นอยู่กับความเป็นกรดและด่างของสารละลายดิน (Soil Solution) ในขณะนั้น กล่าวคือ ถ้าสารละลายดิน (Soil Solution) มีความเป็นกรดเพิ่มมากขึ้น ปริมาณอนุมูลฟอสเฟตส่วนใหญ่หรือเกือบทั้งหมดจะอยู่ในรูป $H_2PO_4^-$ ซึ่งพืชดูดไปใช้ได้ง่ายที่สุด ในทางตรงกันข้ามถ้าสารละลายดิน (Soil Solution) มีความเป็นด่างเพิ่มมากขึ้น ฟอสเฟตส่วนใหญ่ในสารละลายดิน (Soil Solution) จะอยู่ในรูป HPO_4^{2-} ซึ่งพืชดูดได้ช้ากว่ารูปแรก (ยงยุทธ โอสดสภา, 2543; Russell, 1973)

นอกจากความเป็นกรดและด่างของสารละลายดิน (Soil Solution) แล้ว ปัจจัยที่ควบคุมความเป็นประโยชน์ของฟอสเฟตในดินยังขึ้นอยู่กับชนิดของสารฟอสเฟต ซึ่งความสามารถในการละลายหรือการปลดปล่อยไอออนฟอสเฟตของสารอนินทรีย์ฟอสเฟตออกสู่สารละลายดิน (Soil Solution) แต่ละชนิดจะเกิดได้ต่างกัน เช่น เหล็กฟอสเฟต แมงกานีสฟอสเฟต และอะลูมิเนียม

ฟอสเฟตจะละลายได้น้อยมาก ในขณะที่ Monocalciumphosphate (CaHPO_4) และ Dicalciumphosphate ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$) สามารถละลายได้ดี เป็นต้น ปริมาณของแคตไอออนต่าง ๆ และสารประกอบต่าง ๆ ที่ชอบทำปฏิกิริยากับไอออนฟอสเฟต ตลอดจนพื้นที่ผิวของสารที่จะปลดปล่อยไอออนฟอสเฟตก็ล้วนมีส่วนสำคัญต่อการควบคุมความเป็นประโยชน์ของฟอสเฟตในดินทั้งสิ้น (ยงยุทธ โอสถสกา และคณะ, 2541)

ลาร์เซน (Larsen, 1967 อ้างถึงใน ญัฐกานต์ เลิศอำไพพร, 2543, หน้า 3) ได้เสนอว่า ฟอสฟอรัสในดินจะอยู่ได้ 3 รูป ซึ่งแต่ละรูปมีความสัมพันธ์กันดังนี้

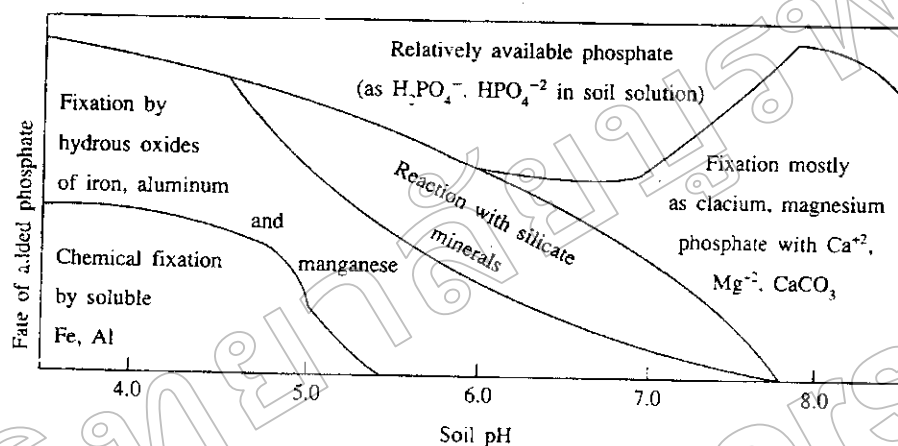
Soil Solution P < --- > Labile Soil P < --- > Nonlabile Soil P

ฟอสฟอรัสในสารละลายดิน (Soil Solution P) โดยปกติจะเกิดความสมดุลอย่างรวดเร็วกับฟอสฟอรัสที่แลกเปลี่ยนได้ (Labile Soil P) และฟอสฟอรัสส่วนที่แลกเปลี่ยนได้นี้จะเกิดความสมดุลกับฟอสฟอรัสส่วนที่แลกเปลี่ยนไม่ได้ (Nonlabile Soil P) อย่างช้า ๆ พืชสามารถดูดฟอสฟอรัสในสารละลายดินนี้ไปใช้ได้ทันที และเมื่อฟอสฟอรัสในส่วนนี้ลดลง ฟอสฟอรัสส่วนที่แลกเปลี่ยนได้ (Labile Soil P) ก็จะละลายออกมาแทนที่ การเกิดภาวะสมดุลระหว่างฟอสฟอรัสในสารละลายดิน (Soil Solution P) กับฟอสฟอรัสส่วนที่แลกเปลี่ยนได้ (Labile Soil P) จะรวดเร็วกว่าภาวะสมดุลระหว่างฟอสฟอรัสที่แลกเปลี่ยนได้ (Labile Soil P) กับฟอสฟอรัสส่วนที่แลกเปลี่ยนไม่ได้ (Nonlabile Soil P) ซึ่งเมื่อฟอสฟอรัสส่วนที่แลกเปลี่ยนได้ (Labile Soil P) ลดลง ส่วนที่แลกเปลี่ยนไม่ได้ (Nonlabile Soil P) ก็จะเปลี่ยนมาเป็นส่วนที่แลกเปลี่ยนได้ แต่เป็นไปในอัตราส่วนที่ช้ามาก

3. การตรึงฟอสฟอรัสในดิน

ปฏิกิริยาของสารประกอบฟอสฟอรัสในดินมีความสำคัญเป็นอย่างมาก เพราะเกี่ยวข้องกับปริมาณฟอสฟอรัสในดินที่พืชจะนำไปใช้ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใส่ปุ๋ยฟอสเฟตที่ละลายง่ายลงไปในดิน พืชจะสามารถได้รับประโยชน์โดยดูดไปใช้ได้จริง ๆ เพียง 10-25 % เท่านั้น ส่วนที่เหลือจะตกค้างอยู่ในดินในรูปที่ยากต่อการที่พืชจะดูดไปใช้ประโยชน์ได้ (ยงยุทธ โอสถสกา และคณะ, 2541) ในทันทีที่ปุ๋ยฟอสเฟตที่อยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้สัมผัสกับดิน ส่วนใหญ่จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างอนุโมลฟอสเฟตที่ละลายน้ำได้กับองค์ประกอบต่าง ๆ ของดินเกิดเป็นตะกอนของสารประกอบฟอสเฟตชนิดใหม่ที่ละลายน้ำได้ยาก ปรากฏการณ์เช่นนี้เราเรียกว่า การตรึงฟอสฟอรัสในดิน (Phosphorus Fixation) (Haseman et al., 1950 อ้างถึงใน นฤมล ชันติสมบุญ, 2531, หน้า 5; Focus on Phosphorus, 1997) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณอินทรีย์วัตถุของดิน ระดับความเป็นกรดและด่างของดิน ชนิดและปริมาณของแร่ดินเหนียว และปริมาณสารประกอบและไอออนบวก

ของอะลูมิเนียม เหล็ก แมงกานีส แคลเซียม และแมกนีเซียมที่อยู่ในสภาพที่จะทำปฏิกิริยากับไอออนฟอสเฟต (ขงยุทธ โอสดสภา และคณะ, 2541; Wild, 1988) ภาพที่ 2-3 แสดงสัดส่วนของการตรึงฟอสเฟตซึ่งเกิดขึ้นที่ระดับ pH ต่าง ๆ ของดิน สำหรับปฏิกิริยาการตรึงฟอสเฟตที่เกิดขึ้นแบ่งออกได้ดังนี้



ภาพที่ 2-3 แสดงสัดส่วนของการตรึงฟอสเฟตซึ่งเกิดขึ้นที่ระดับ pH ต่าง ๆ ของดิน (ขงยุทธ โอสดสภา และคณะ, 2541)

ก) ปฏิกิริยาการดูดซับอยู่ตามผิว (Adsorption Reaction)

อนุภาคของดินที่มีขนาดเล็กที่อยู่ในสภาพของคอลลอยด์ เช่น พวกแร่ดินเหนียวต่าง ๆ อินทรีย์วัตถุ และออกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียม มีประจุไฟฟ้าแฝงอยู่และไอออนฟอสเฟตก็มีประจุไฟฟ้าแฝงอยู่เช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงสามารถดูดซับยึดกันไว้ได้ดังนี้

ถ้าแรงดูดยึดกันคือแรง Van Der Waal's Force ซึ่งเป็นแรงดูดยึดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน ๆ และเป็นแรงที่ไม่กำหนดทิศทาง ก็จะเป็นการดูดซับที่เรียกว่า Physical Adsorption (สุพจน์ โตตระกูล, 2526) ซึ่งจะมีผลทำให้ไอออนฟอสเฟตรวมอัดตัว (Condensation) อยู่รอบ ๆ พื้นผิวของคอลลอยด์เท่านั้น โครงสร้างของคอลลอยด์ไม่มีอะไรเปลี่ยนแปลง (ขงยุทธ โอสดสภา และคณะ, 2541)

ถ้าไอออนฟอสเฟตจับตัวสารคอลลอยด์ด้วยพันธะเคมี (Chemical Bond) หรือการจับตัวกันด้วยแขนของแอมโฟเทอริกไอออนทำให้เกิดโมเลกุลของสารขึ้น ก็จะเป็นการดูดซับแบบ Chemical Adsorption ซึ่งก็อาจจะเกิดขึ้นได้เพราะสารคอลลอยด์เหล่านี้มี Hydroxyl และ Silicate Group ซึ่งอาจจะหลุดออกไป เหลือตำแหน่งที่จะต้องทำให้สมดุลด้วยแอมโฟเทอริกไอออนฟอสเฟต

ก็อาจจะเข้ามาอยู่ในตำแหน่งนี้ได้ จึงก่อให้เกิดการจับตัวกันด้วยพันธะทางเคมี (ยงยุทธ โอสดสภา และคณะ, 2541; สุพจน์ โดตระกูล, 2526)

ปริมาณฟอสเฟตที่ถูกดูดซับด้วยวิธี Chemical Adsorption นี้ โดยทั่ว ๆ ไปมักจะต่ำกว่า ด้วยวิธี Physical Adsorption เพราะตำแหน่งที่ไอออนฟอสเฟตเข้าจับตัวกับคอลลอยด์มีจำกัด อย่างไรก็ตาม ไอออนฟอสเฟตที่ถูกดูดซับอยู่ที่พื้นผิวของสารคอลลอยด์เหล่านี้ จะถูกดูดซับไว้ด้วย แรงจำนวนหนึ่ง ไม่ว่าจะเป็นการดูดซับด้วยวิธีใดก็ตาม น้ำไม่อาจจะละลายไอออนฟอสเฟตนี้กลับ ออกมาอยู่ในสารละลายของดินได้ ฟอสเฟตเหล่านี้จึงอยู่ในสภาพที่ถูกตรึง

ข) ปฏิกริยาการแทนที่ด้วยไอออนที่มีขนาดไอออนเท่ากัน (Isomorphous Replacement Reaction)

ไอออนฟอสเฟตที่ถูกดูดซับอยู่โดยรอบพื้นผิวของแร่ดินเหนียว จะค่อย ๆ เคลื่อนตัวเข้าไปอยู่ในช่องว่างระหว่างผลึกต่อผลึกของ Clay Colloid ไอออนฟอสเฟตบางไอออนจะค่อย ๆ เปลี่ยนจากสภาพที่ถูกดูดซับ เป็นการเข้าแทนที่แอนไอออนของผลึก (เช่น Hydroxyl, Silicate) แล้ว ไอออนฟอสเฟตจะจับตัวกับคอลลอยด์ด้วยพันธะทางเคมี เคมีที่เดิมเมื่อคอลลอยด์ยังมี Hydroxyl (ขนาดเล็กกว่าไอออนฟอสเฟต) หรือ Silicate Group (ขนาดใกล้เคียงกับไอออนฟอสเฟต) รวมอยู่ในโครงสร้างของมันนั้น สภาพของโครงสร้างและผลึก จะคงตัวเป็นรูปร่างที่คงที่ แต่เมื่อไอออนฟอสเฟตเข้ามาแทนที่ Hydroxyl หรือ Silicate โครงสร้างของผลึกจะไม่คงที่อยู่อีก เพราะขนาดของไอออนฟอสเฟตกับไอออนที่มันแทนที่ไม่เท่ากัน เมื่อเป็นเช่นนี้ผลึกของ Clay Colloid ที่มีไอออนฟอสเฟตอยู่ด้วย ก็ต้องจัดเรียงตัวเสียใหม่ เพื่อให้ได้โครงสร้างและรูปร่างของผลึกที่คงที่ ไอออนฟอสเฟตจึงถูกจับติดแน่นเป็นองค์ประกอบของแร่ดินเหนียวชนิดใหม่อย่างถาวร ดังนั้น ฟอสเฟตจำนวนนี้ก็จะถูกตรึงโดยที่ไม่มีโอกาสจะหลุดออกมาอยู่ในสารละลายดินอีก นอกเสียจากแร่ดินเหนียวชนิดใหม่นี้จะถูกทำให้สลายตัว (ยงยุทธ โอสดสภา และคณะ, 2541)

ค) ปฏิกริยาการแตกตัวแล้วทำปฏิกิริยา (Double Decomposition)

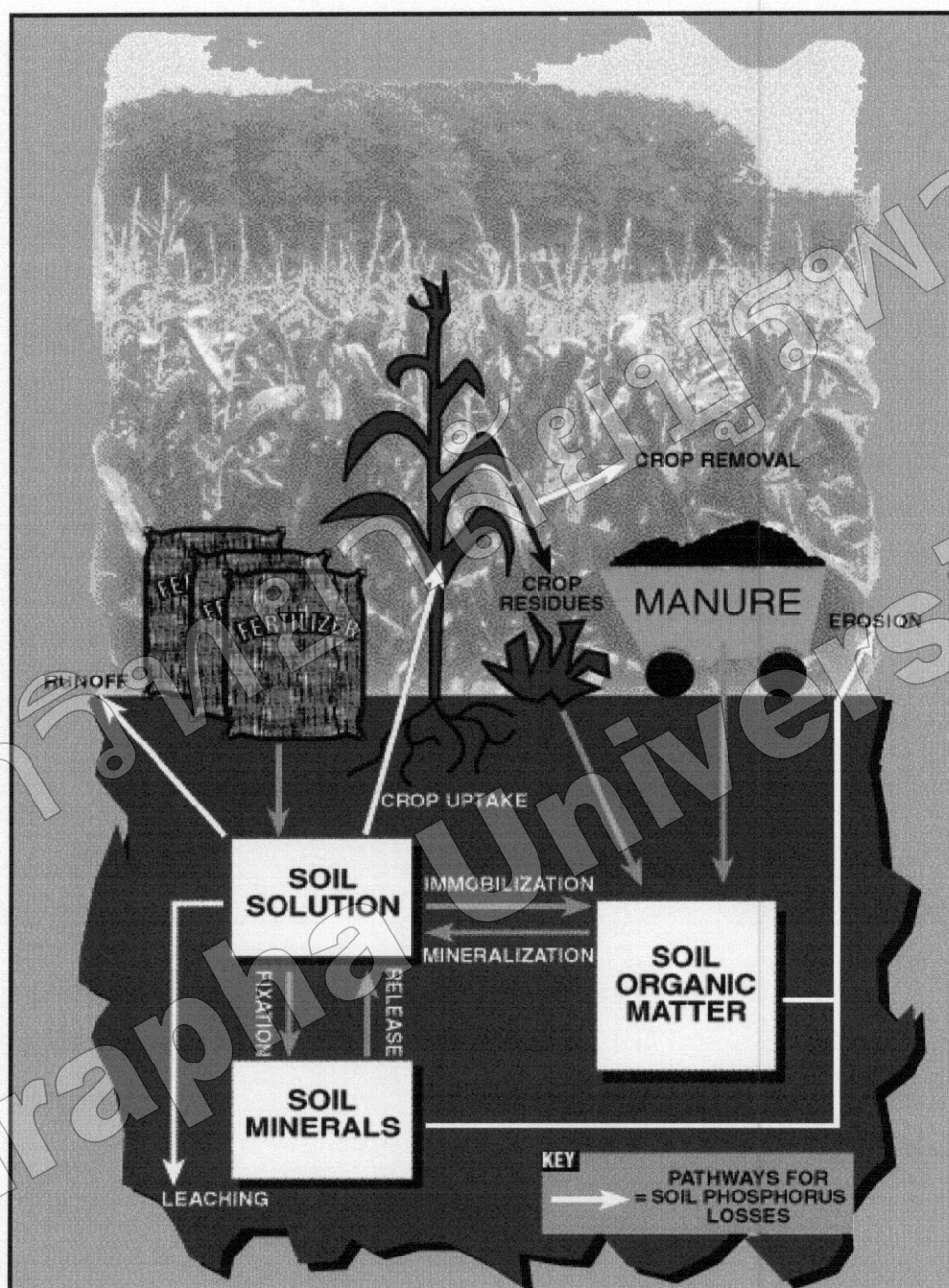
สารประกอบฟอสเฟตที่ละลายได้ดี จะละลายและแตกตัวให้ไอออนฟอสเฟตและไอออนบวกอื่น ๆ ในดินมีสารประกอบต่าง ๆ เช่น เหล็กออกไซด์ เหล็กไฮดรอกไซด์ อะลูมินัมไฮดรอกไซด์ แคลเซียมคาร์บอเนต แมกนีเซียมคาร์บอเนต เมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม สารประกอบเหล่านี้จะละลายและแตกตัวให้ไอออนบวกต่าง ๆ เช่น แคตไอออนของเหล็ก อะลูมินัม แคลเซียม และแมกนีเซียม อยู่ในสารละลายดิน และเมื่อไอออนฟอสเฟตกับแคตไอออนเหล่านี้พบกันจะทำปฏิกิริยากัน เกิดเป็นสารประกอบฟอสเฟตที่ละลายยากยิ่งขึ้น เช่น เกิดเป็นเหล็กฟอสเฟต อะลูมินัมฟอสเฟต แคลเซียมฟอสเฟต และสารประกอบที่มีสูตรโมเลกุลสลับซับซ้อน

ยิ่งขึ้น เมื่อเกิดสารประกอบฟอสเฟตที่ละลายยากยิ่งขึ้นจึงเป็นการตรึงฟอสเฟต (สุพจน์ โตะตระกูล, 2526)

ปฏิบัติการการแตกตัวแล้วทำปฏิกิริยานี้ ก่อให้เกิดการตรึงฟอสเฟตตลอดเวลาอย่างช้า ๆ ไม่ว่าดินจะมีความเป็นกรดและด่างระดับใด เพราะสารประกอบฟอสเฟตกับสารประกอบอื่น สัมผัสกันตลอดเวลา เมื่อใดมีการแตกตัวให้ไอออนฟอสเฟตออกมาพบกับแคตไอออนที่แตกตัวออกมา และมีปริมาณเกินกว่าค่าผลคูณของสารประกอบที่ละลายยากชนิดนั้น ๆ ก็จะเกิดผลึก สารประกอบฟอสเฟตชนิดนั้นที่ละลายยากทันที แต่ปริมาณของการตรึงฟอสเฟตด้วยขบวนการนี้ ต่ำมาก เมื่อเทียบกับขบวนการดูดซับอยู่ตามผิวอนุภาคดิน (ยงยุทธ โอสถสกา และคณะ, 2541)

4. การสูญเสียฟอสฟอรัสจากดิน

การที่พืชสามารถดูดฟอสฟอรัสไปใช้ได้จริง ๆ เพียง 10-25 % นั้น (ยงยุทธ โอสถสกา และคณะ, 2541) ทำให้ในสภาพสิ่งแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมสามารถทำให้เกิดการสูญเสียฟอสฟอรัส ออกจากดินได้ โดยกระบวนการที่เกิดขึ้นนี้อาจเกิดจากกระบวนการการชะล้าง (Leaching) การ ระเหิด (Volatilization) หรือเกิดจากการกัดเซาะ (Erosion) (เกษมศรี ชับช้อน, 2534; Focus on Phosphorus, 1997) สำหรับการสูญเสียฟอสฟอรัสจากดินอันเนื่องมาจากการชะล้างจะมีมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำฝนและชนิดของเนื้อดิน เช่น ดินเนื้อหยาบหรือดินทรายจะมีการชะล้าง มาก ดังนั้นก็สามารถทำให้เกิดการสูญเสียฟอสฟอรัสมากตามไปด้วยเช่นกัน ส่วนการระเหิดพบว่า ภายใต้สภาพออกซิไดซ์และที่ระดับ pH ของดิน ฟอสฟอรัสจะมีความเสถียรอยู่ในรูปออร์โท ฟอสเฟต และไม่สูญเสียไปโดยการระเหิด อย่างไรก็ตาม พบว่าฟอสฟอรัสสามารถถูกเปลี่ยนเป็น ก๊าซในรูปฟอสฟีน (PH₃) ในการบ่มดินภายใต้สภาพขาดออกซิเจน และมีการเติมปุ๋ยหมักรวมทั้ง Dibasic Ammonium Phosphate รวมอยู่ด้วย (Tsubota, 1959 อ้างถึงใน อำนาจ สุวรรณฤทธิ์, 2525 , หน้า 8.5-8.6) ภาพที่ 2-4 แสดงพฤติกรรมและความเป็นไปของฟอสฟอรัสที่เกิดขึ้นในดิน



ภาพที่ 2-4 พฤติกรรมและความเป็นไปของฟอสฟอรัสที่เกิดขึ้นในดิน (Focus on Phosphorus, 1997)

ดัชนีที่ใช้บ่งชี้การเร่งการเจริญเติบโตของพืชของไคโตซาน

ดัชนีที่ใช้บ่งชี้การส่งเสริมการเร่งการเจริญเติบโตของพืชของไคโตซาน ในที่นี้จะศึกษาดัชนีที่เกี่ยวข้อง 2 ดัชนี ได้แก่ หนึ่ง การศึกษาการตอบสนองการเจริญเติบโตของพืชต่อไคโตซาน และสอง จากวิธีการประเมินปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืชของดินและปุ๋ย ซึ่งจะบ่งชี้ด้วยค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของธาตุฟอสฟอรัสกับดิน (E-Value) และค่าความเป็นประโยชน์ของปุ๋ยฟอสเฟตของพืช (%FPU) ตามลำดับ

สำหรับดัชนีวัดปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืชของดินและปุ๋ยนี้ จะเกี่ยวข้องกับค่าอะไวเลเบิล ควอนติตี (Available Quantity) ซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงปริมาณแร่ธาตุอาหารของพืชที่อยู่ในดินสภาพของแข็งบริเวณผิว แร่ธาตุบริเวณนี้รากของพืชดูดไปใช้ได้ง่าย เพราะเป็นส่วนที่ละลายในสภาพสารละลายของดินโดยตรงได้ ปุ๋ยต่าง ๆ ทางเคมีและกายภาพจะมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาการปลดปล่อย (Release) หรือแลกเปลี่ยน (Exchange) ของสารอาหารเหล่านี้ และจะมีผลต่อค่าอะไวเลเบิล ควอนติตีนี้ อย่างไรก็ตาม พืชยังสามารถนำปริมาณธาตุอาหารนี้ไปใช้ได้ ถือเป็นความสามารถของปริมาณธาตุอาหารที่พืชนำไปใช้ได้

วิธีการหาปริมาณอะไวเลเบิล ควอนติตี สามารถทำได้โดยอาศัยวิธีทางเคมีธรรมดา เช่น การสกัดด้วยสารละลายกรด ค่าง หรือเกลือ ทั้งในรูปกรดอินทรีย์และ Chelating Agent ต่าง ๆ โดยปริมาณที่วัดได้จะเชื่อมโยงและมีความสัมพันธ์กับปริมาณที่พืชนำไปใช้ อย่างไรก็ตาม วิธีการนี้อาจได้ผลไม่ดีหากมีปฏิกิริยาของสารอาหารในสภาพของแข็งกับสารต่าง ๆ ที่ใช้ในการสกัด ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้ไม่แม่นยำและเที่ยงตรงเพียงพอ (พรณี พักคง, 2529)

การนำเรดิโอไอโซโทปเข้ามาช่วยตรวจสอบปริมาณสารอาหารที่อยู่ในรูปที่สามารถเกิดการแลกเปลี่ยนได้ เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ทำได้โดยไม่ต้องอาศัยวิธีการยุ่งยาก เนื่องจากเรดิโอไอโซโทปสามารถใช้เป็นตัวติดตามปริมาณสารอาหารที่เกิดการแลกเปลี่ยนได้ในสภาพสมดุลที่มีอยู่แล้วในธรรมชาติ ดังนั้นผลการหาปริมาณจะได้ค่าประเมินปริมาณอะไวเลเบิล ควอนติตีได้อย่างดี และมีความเชื่อถือสูงกว่าวิธีการอื่น จึงเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการศึกษาดังกล่าว (พรณี พักคง, 2529) หลักการทั่วไป คือ ใช้เรดิโอไอโซโทปของธาตุอาหารที่ต้องการศึกษาซึ่งทราบปริมาณแน่นอนค่าหนึ่ง ผสมลงไปในระบบที่ต้องการศึกษาธาตุนั้น ๆ ซึ่งเรดิโอไอโซโทปที่เติมลงไปควรมีองค์ประกอบทางเคมีเช่นเดียวกับสารที่ต้องการศึกษา และควรทิ้งไว้ให้สารละลายนั้นอยู่ในสภาพสมดุล การคำนวณเชิงปริมาณจะใช้หลักการของเทคนิคการเจือจางด้วยไอโซโทป (Isotopes Dilution Techniques) นั่นคือ

$$\frac{\text{ปริมาณสารในสภาพของแข็ง}}{\text{ปริมาณสารในสภาพสารละลาย}} = \frac{\text{ปริมาณตัวติดตามในสภาพของแข็ง}}{\text{ปริมาณตัวติดตามในสารละลาย}} \quad (1)$$

ทั้งนี้สมการสมดุลที่เกิดขึ้น กรณีของการศึกษาฟอสฟอรัสในดิน โดยเติมฟอสฟอรัส-32 เป็นตัวติดตาม แสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 2



สำหรับการศึกษาการแลกเปลี่ยนฟอสฟอรัสที่อยู่ในดิน ในสภาพของแข็งกับฟอสเฟตในสารละลายในที่นี้ จะศึกษาจากดัชนี 2 ค่า ได้แก่ Isotopically Exchangeable Phosphate (E-Value) ซึ่งอาศัยหลักการพื้นฐานเช่นเดียวกับการศึกษาหาค่า K_d (Solid-Water Distribution Coefficient) และค่าความเป็นประโยชน์ของปุ๋ยฟอสเฟตต่อพืช (% Fertilizer P Utilization, % FPU) ซึ่งอาศัยหลักการพื้นฐานเช่นเดียวกับการศึกษาหาค่า BAF (Bioaccumulation Factor) หรือ Transfer Factor รายละเอียดของดัชนีที่ใช้บ่งชี้การส่งเสริมการเร่งการเจริญเติบโตของพืชของโคโคซาน มีดังนี้

1. การตอบสนองการเจริญเติบโตของพืชต่อโคโคซาน

การศึกษากการตอบสนองการเจริญเติบโตของพืชต่อโคโคซาน โดยการตรวจวัดค่าความสูงของต้นพืช ความยาวของรากพืช และน้ำหนักแห้งของต้นและรากพืช ว่ามีลักษณะการตอบสนองในด้านการเจริญเติบโตของพืชต่อโคโคซานอย่างไร เป็นวิธีที่สะดวกไม่ยุ่งยากซับซ้อน ประกอบกับผลการศึกษาที่ได้สามารถนำมาใช้เป็นข้อมูลเชื่อมโยงกับการศึกษาประสิทธิภาพของการใช้ธาตุอาหารในดินของพืชต่อโคโคซานได้ เนื่องจากภายหลังจากที่พืชดูดกินธาตุอาหารจากดินเข้ามาในพืช พืชจะใช้ประโยชน์ของธาตุอาหารเหล่านั้นโดยตรง และทางอ้อม ทำให้เกิดการเจริญเติบโตขึ้น (ถวิล ครุฑกุล, 2524)

อย่างไรก็ตาม ลักษณะการตอบสนองต่อโคโคซานของพืชเมื่อวัดค่าเป็นความสูงของต้นพืช ความยาวของรากพืช และน้ำหนักแห้งของต้นและรากพืช อาจมีรูปแบบที่ผิดไปจากรูปแบบหลัก ทั้งนี้เนื่องจากการเจริญเติบโตของพืชที่จะนำมาหาค่าบ่งบอกนั้นอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมต่าง ๆ ซึ่งแปรปรวนตลอดเวลา หรือเกิดจากผลรวมที่เกิดจากปัจจัยหลายปัจจัยรวมกัน ดังนั้นจึงทำให้เกิดปัญหาของการใช้ค่าความสูงของต้นพืช ความยาวของรากพืช และน้ำหนักแห้งของต้นและรากพืชเป็นดัชนีชี้ชัดว่า ผลการตอบสนองของพืชต่อโคโคซานเป็นเช่นไร (ถวิล ครุฑกุล, 2524) ดังนั้นจึงทำการศึกษาปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืชของดินและปุ๋ยควบคุมไปด้วย เพื่อนำผล

การศึกษาที่ได้จากทั้งสองส่วนมาเชื่อมโยงกัน ทำให้การประเมินผลการศึกษามีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

2. การแลกเปลี่ยนไอโซโทปโดยใช้สารกัมมันตรังสีฟอสฟอรัส (Isotopically Exchangeable Phosphate, E-Value)

วิธี Isotopically Exchangeable Phosphate หรือการหาค่า E-Value เป็นวิธีที่ใช้สำหรับบ่งชี้ถึงปริมาณของฟอสฟอรัสที่อยู่ในสภาวะไอออนบนผิวหน้าดินกับฟอสฟอรัสในสารละลายดิน ซึ่งสามารถแลกเปลี่ยนกับอนุมูลออร์โทฟอสเฟตซึ่งเดิมลงไปในรูปแบบสารละลาย (พรหมิ พักกง, 2529; มีศักดิ์ มลิณทวิสมัย, 2537) โดยวิธีการนี้ McAuliffe และคณะ (McAuliffe et al., 1948 cited in Fried, 1957, p. 2; Russell, 1988; Wild, 1988) เป็นผู้พัฒนาและเสนอขึ้น โดยตั้งอยู่บนสมมติฐานดังสมการที่ 2 ซึ่งในการศึกษาจะศึกษาในดินเพียงอย่างเดียวไม่มีพีชมาเกี่ยวข้อง

จากหลักการดังกล่าว สามารถใช้วัดปริมาณฟอสเฟตที่ผิวของอนุภาคดินได้ ซึ่งจะมีค่าสอดคล้องกับระดับความอุดมสมบูรณ์ของฟอสเฟตของดิน ทั้งนี้โดยเติมฟอสฟอรัส-32 ซึ่งละลายในน้ำปริมาณน้อยลงไปดินที่อยู่ในน้ำ และเมื่อถึงจุดสมดุลจะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 3 จากนั้นวัดปริมาณฟอสฟอรัส-32 ที่เหลืออยู่ในสารละลายดิน ก็จะทราบปริมาณฟอสฟอรัส-32 ที่ถูกดินดูดซับไป เมื่อวัดปริมาณฟอสฟอรัส-31 ในสารละลายดิน ก็สามารถคำนวณหาปริมาณฟอสฟอรัสของดินที่เป็นประโยชน์ต่อพืชได้ ซึ่งในที่นี้คือ ฟอสฟอรัส-31 (Solid)

$$P^{32}(\text{Solid}) / P^{32}(\text{Solution}) = P^{31}(\text{Solid}) / P^{31}(\text{Solution}) \quad (3)$$

อย่างไรก็ตาม ปฏิกริยาการแลกเปลี่ยนไอโซโทประหว่างฟอสฟอรัส-31 ในดินกับฟอสฟอรัส-32 จากปุ๋ยที่เติมลงไปจะขึ้นกับเวลา เมื่อเวลามากขึ้นปฏิกริยาก็จะเข้าใกล้สภาวะสมดุลมากขึ้น (Wild, 1988) สำหรับดินชนิดหนึ่ง ๆ ปริมาณฟอสฟอรัสในดินที่จะทำปฏิกริยาแลกเปลี่ยนไอโซโทปจะมากขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น แต่สภาวะสมดุลจริงเป็นจุดที่ถึงได้ยาก เพราะจะมีการแพร่กระจายของอนุมูลฟอสเฟตจากสารละลายเข้าไปสู่ส่วนที่เป็นอนินทรีย์ฟอสเฟตในดิน หรือมีการแลกเปลี่ยนระหว่างอนุมูลฟอสเฟตกับส่วนของฟอสเฟตที่ไม่ได้อยู่ที่ผิวดิน ซึ่งในทางปฏิบัติพบว่าเป็นการยากที่จะทราบว่าการแลกเปลี่ยนอนุมูลระหว่างสารที่เติมลงไปกับที่อยู่ในดินจะเกิดขึ้นที่ผิวดินเท่านั้นหรือเกิดการแลกเปลี่ยนที่ชั้นในของเนื้อดินด้วย (McAuliffe et al., 1948 อ้างถึงใน มีศักดิ์ มลิณทวิสมัย, 2537, หน้า 15) ดังนั้นการเลือกเวลาในการทำปฏิกริยาจึงเลือกที่จุดที่การแลกเปลี่ยนไอออนเข้าใกล้จุดสมดุลมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ โดยเวลาที่ใช้ในการทดลองเพื่อทำให้เกิดสมดุล พบว่า มีช่วงเวลาดังแต่ไม่ถึง 1 วันจนกระทั่งถึง 14 วันก็มี (Russel et al. อ้างถึงใน มีศักดิ์ มลิณทวิสมัย, 2537, หน้า 15; Fried, 1957)

สำหรับการวัดปริมาณการแลกเปลี่ยนของฟอสฟอรัสที่ติดสลาด้วยฟอสฟอรัส-32 กับ ฟอสฟอรัสของดินนั้น สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 4 (Blume & Smith, 1954 cited in Menzel & Smith, 1984, pp. 14-16) หรือสมการที่ 5 (มีศักดิ์ มลิทวิสมัย, 2537) โดยที่

$$X = \left(\frac{AC}{B} \right) - C \quad (4)$$

เมื่อ	X	คือ	Exchangeable P
	A	คือ	ความแรงรังสีจำเพาะเริ่มต้นในสารละลาย
	B	คือ	ความแรงรังสีจำเพาะสุดท้ายในสารละลาย
	C	คือ	ปริมาณฟอสฟอรัสเริ่มต้นในสารละลาย

$$E_t = \left(\frac{X_t \times Y}{Y_t} \right) - X \quad (5)$$

เมื่อ	E _t	คือ	Isotopically Exchangeable Soil P
	X	คือ	ปริมาณ P ³¹ เริ่มต้นในสารละลาย
	X _t	คือ	ปริมาณ P ³¹ ที่เหลืออยู่ในสารละลายเมื่อเวลา t
	Y	คือ	ปริมาณ P ³² เริ่มต้นในสารละลาย
	Y _t	คือ	ปริมาณ P ³² ที่เหลืออยู่ในสารละลายเมื่อเวลา t

สมการที่ 4 และ 5 อาศัยหลักการของเทคนิคการเจือจางด้วยไอโซโทปที่มีอยู่ว่า เมื่อต้องการหาปริมาณของสารประกอบชนิดหนึ่งที่อยู่รวมกันในสารผสมโดยการเติมสารประกอบชนิดเดียวกันแต่ติดป้ายด้วยสารกัมมันตรังสีเข้าไปในสารผสมนั้น ค่าความแรงรังสีจำเพาะที่เติมเข้าไปก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเจือจาง จากค่าที่เปลี่ยนแปลงไปนี้สามารถนำมาคำนวณหาปริมาณของสารประกอบที่ต้องการวิเคราะห์ได้ (พรรณี พักคง, 2529) ยกตัวอย่างเช่น การหาปริมาณสารประกอบ A ในระบบอันหนึ่ง มีขั้นตอนการหาปริมาณดังนี้

- 1) กำหนดให้ปริมาณสารประกอบ A มีน้ำหนัก x กรัม
 - 2) เติมสารประกอบติดป้าย A* ความแรงรังสี D หน่วย y กรัมลงไป
- ดังนั้น ค่าความแรงรังสีจำเพาะ S₁ จำนวนได้ดังนี้ คือ

$$S_1 = \frac{D}{y} \quad (6)$$

3) ผสมสารประกอบ A และสารประกอบติดป้าย A* ให้เข้ากัน ผ่านขบวนการแยกและทำให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีทางเคมี แต่ไม่จำเป็นต้องครอบคลุมปริมาณทั้งหมด แล้วนำมาวัดความแรงรังสีจำเพาะหลังการคำนวณได้ดังนี้

$$S_2 = \frac{D}{x + y} \quad (7)$$

จากสมการที่ 6 $y = \frac{D}{S_1} \quad (8)$

แทนที่ y ในสมการที่ 7 $S_2 = \frac{D}{x + \left(\frac{D}{S_1}\right)} \quad (9)$

จัดรูปสมการใหม่ $x = \left(\frac{D}{S_2} - \frac{D}{S_1}\right) \text{ หรือ } \frac{D}{S_1} \left(\frac{S_1}{S_2} - 1\right)$
 $x = yx \left(\frac{S_1}{S_2} - 1\right) \quad (10)$

จากสมการที่ 5 จะเห็นได้ว่า ถ้าฟอสฟอรัสในสารละลายเกิดการแลกเปลี่ยนกับฟอสฟอรัสที่มีอยู่เดิมในดินซึ่งเป็นฟอสฟอรัส-31 อัตราส่วน Yt/Xt หรือความแรงรังสีจำเพาะของฟอสฟอรัส-32 จะมีค่าลดลงมาก ถ้าเกิดปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนระหว่างฟอสฟอรัสในสารละลายกับฟอสฟอรัสในดินมาก กรณีนี้จะทำให้การวัดปริมาณการแลกเปลี่ยนไอโซโทปของฟอสฟอรัสของดินเป็นไปอย่างถูกต้อง แต่ถ้าตัวอย่างดินนั้นมีสมบัติในการตรึงฟอสฟอรัส จะทำให้อัตราส่วน Yt/Xt ลดลงมากกว่าในกรณีที่ดินนั้นเกิดปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนไอโซโทปของฟอสฟอรัสอย่างเดียว ในกรณีเช่นนี้จะทำให้การประมาณปริมาณการแลกเปลี่ยนไอโซโทปของฟอสฟอรัสสูงกว่าความเป็นจริง อย่างไรก็ตาม การตรวจสอบการตรึงฟอสฟอรัสของดินสามารถทำได้โดยการเติมฟอสฟอรัสในอัตราที่แตกต่างกัน ถ้าดินมีการแลกเปลี่ยนไอโซโทปเพียงอย่างเดียวโดยไม่มีการตรึงฟอสฟอรัส จะพบว่าค่าการแลกเปลี่ยนฟอสฟอรัสในอัตราที่แตกต่างกันนั้นควรจะมีค่าเท่ากัน (มีศักดิ์ มลิณทวิสมัย, 2537)

3. การวัดค่าความเป็นประโยชน์ของปุ๋ยฟอสเฟตต่อพืช (% Fertilizer P Utilization, % FPU) โดยใช้เทคนิคทางนิวเคลียร์ของสารกัมมันตรังสีฟอสฟอรัส

เนื่องจากพืชมีความสามารถดูดกินธาตุอาหารเดียวกันแต่ต่างไอโซโทปกันเข้าไปได้ในลักษณะเดียวกัน โดยไม่มีนิสัยเลือกดูดกินเฉพาะไอโซโทปใดไอโซโทปหนึ่ง (ของธาตุนั้น ๆ) เช่น พืชดูดกินไอโซโทปฟอสฟอรัส-32 ได้เช่นเดียวกับไอโซโทปฟอสฟอรัส-31 โดยไม่มีความแตกต่างกันแต่อย่างใด ดังนั้น เมื่อใส่ปุ๋ยลงไปในรูปแบบไอโซโทปก็สามารถแยกได้ว่าที่เข้าไปอยู่ในพืชนั้น

ปริมาณเท่าใดมาจากดิน ปริมาณเท่าใดมาจากปุ๋ย และจากค่าเหล่านี้สามารถตัดแปลงออกมาเป็นการบ่งบอกค่าความเป็นประโยชน์ของปุ๋ยฟอสเฟตต่อพืชได้ (ถวิล ครุฑกุล, 2524)

ทั้งนี้ค่าความเป็นประโยชน์ของปุ๋ยฟอสเฟตต่อพืช (% FPU) เป็นค่าที่ใช้บ่งชี้ถึงความเป็นประโยชน์ของธาตุฟอสฟอรัสที่พืชได้รับจากปุ๋ย ซึ่งในการหาจะทำได้โดยเปรียบเทียบสัดส่วนระหว่างปริมาณธาตุฟอสฟอรัสที่พืชได้รับจริงจากปุ๋ยกับปริมาณมาตรฐานของปุ๋ยที่เติมลงไป ทั้งนี้ข้อมูลเบื้องต้นที่จำเป็นต้องรวบรวมจากการทดลอง เพื่อนำมาคำนวณหาค่า % FPU (International Atomic Energy Agency, 2001) ได้แก่

- Dry Matter Yield
 - Total P Concentration (% P in Dry Matter)
 - ความแรงรังสีจำเพาะของพืช (Plant Specific Activity, S.A. Plant)
 - ความแรงรังสีจำเพาะของปุ๋ย (Fertilizer Specific Activity, S.A. Fertilizer)
 - Radioisotopically-Labelled Fertilizer Used และอัตราที่ใช้
- สำหรับขั้นตอนการคำนวณหา % FPU สามารถทำได้ดังนี้
- คำนวณหาค่าความแรงรังสีจำเพาะของพืชและปุ๋ย (S.A. Plant และ S.A. Fertilizer)
 - คำนวณหา % Pdff ดังสมการที่ 11

$$\% Pdff = (S.A. Plant / S.A. Fertilizer) \times 100 \quad (11)$$

- คำนวณหา Dry Matter Yield Per Unit Area ดังสมการที่ 12

$$DM Yield (Kg/ha) = FW, Kg \times (10,000, m^2 / Area Harvested, m^2) \times (Sample DW, Kg / Sample FW, Kg) \quad (12)$$

- คำนวณหา P Yield ดังสมการที่ 13

$$P Yield (Kg/ha) = DM Yield (Kg/ha) \times (\% P / 100) \quad (13)$$

- คำนวณหา Fertilizer P Yield ดังสมการที่ 14

$$Fertilizer P Yield (Kg/ha) = P Yield (Kg/ha) \times (\% Pdff / 100) \quad (14)$$

- คำนวณหา % Fertilizer P Utilization ดังสมการที่ 15

$$\% \text{ Fertilizer P Utilization} = \left(\frac{\text{Fertilizer P Yield} / \text{Rate of P Application}}{\text{Rate of P Application}} \right) \times 100 \quad (15)$$

4. วิธีการวัดความแรงรังสีของฟอสฟอรัส-32 ในสารละลายสกัดดินและพืช

การทดลองที่เกี่ยวข้องกับการใช้ฟอสฟอรัส-32 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการใช้ธาตุฟอสฟอรัสในดิน การวัดปริมาณความแรงรังสีของไอโซโทปฟอสฟอรัส-32 นิยมใช้เครื่องวัดลิวทิลเลชัน (Liquid Scintillation Counter) เป็นเครื่องมือในการวัดรังสี ซึ่งข้อดีของการวัดด้วยเครื่องมือชนิดนี้คือ ตัวอย่างจะสัมผัสโดยตรงกับหัววัด และจะผสมเข้ากันจนเป็นสารละลายเดียวกัน ทำให้สามารถวัดปริมาณรังสีจากสารกัมมันตรังสีได้โดยมีประสิทธิภาพการวัดสูงกว่าเครื่องมือชนิดอื่น (พรณี พักคง, 2529) สำหรับวิธีการวัดไอโซโทปฟอสฟอรัส-32 สามารถทำได้ 2 วิธี ได้แก่

วิธีที่หนึ่ง แบบลิวทิลเลชันที่มีการเติมค็อกเทล (Cocktail) ซึ่งเป็นซิลทิลเลเตอร์ (Scintillator) ลงไปในตัวอย่างที่อยู่ในรูปสารละลาย แล้ววัดแสงที่เกิดขึ้น เนื่องจากการทำปฏิกิริยาของรังสีบีตาที่ให้โดยฟอสฟอรัส-32 กับสารซิลทิลเลเตอร์ซึ่งเป็นค็อกเทล (Cocktail) แล้วจึงวัดแสงที่เปล่งออกมาจากซิลทิลเลเตอร์นั้น (พรณี พักคง, 2529; มีศักดิ์ มลิณทวิสมัย, 2537)

วิธีที่สอง เป็นการวัดความแรงรังสีของฟอสฟอรัส-32 ด้วยเครื่องลิวทิลเลชันแบบไม่เติมค็อกเทล (Cocktail) โดยสารตัวอย่างที่ให้รังสีบีตาและอยู่ในรูปของสารละลายน้ำสามารถวัดรังสีได้โดยตรง โดยเครื่องจะวัดรังสีจากการเกิดปรากฏการณ์ที่ให้รังสี เซเรนคอฟ เนื่องจากอนุภาคบีตาที่มีพลังงานสูงถึงระดับหนึ่งจะวิ่งผ่านน้ำด้วยความเร็วมากกว่าแสงแต่โดยหลักทั่ว ๆ ไปจะไม่มีอนุภาคใดที่วิ่งเร็วกว่าความเร็วของแสงในสุญญากาศได้ ดังนั้นอนุภาคบีตาจึงจำเป็นต้องถ่ายทอดพลังงานให้กับตัวกลาง โดยการเปล่งแสงออกมาในช่วงคลื่นที่มองเห็นได้จนถึงอุลตราไวโอเลต เรียกว่า รังสีเซเรนคอฟ ซึ่งอนุภาคบีตาของฟอสฟอรัส-32 สามารถทำให้เกิดรังสีเซเรนคอฟได้ วิธีนี้มีข้อดีกว่าวิธีแรกคือ ไม่ต้องใช้ซิลทิลเลเตอร์ ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการวัด ประกอบกับเป็นการวัดที่มีตัวกลางเป็นน้ำ ดังนั้นจึงไม่มีการเกิดขบวนการถ่ายทอดพลังงานจากตัวทำละลายให้กับสารเรืองแสง จึงไม่มีเคมีคัลเลวนซึ่งเกิดขึ้น แต่ถ้าตัวอย่างมีสีปะปนก็จะทำให้เกิดคัลเลอร์เลวนซึ่งขึ้นได้ นอกจากนี้วิธีการวัดรังสีเซเรนคอฟยังสามารถใช้วัดตัวอย่างที่มีปริมาตรมาก เช่น 10-20 มิลลิลิตร ได้โดยไม่ต้องคำนึงถึงความเป็นเนื้อเดียวกันของตัวอย่าง (พรณี พักคง, 2529; L'Annunziata, 1998) รวมทั้งจากการศึกษาของมีศักดิ์ มลิณทวิสมัย (2537) พบว่า วิธีการวัดความแรงรังสีของฟอสฟอรัส-32 ในสารละลายสกัดดินและสารสกัดพืชเพื่อวัดค่า E-Value และค่า

L-Value ของดินเมื่อทำการวัดด้วยเครื่องวัดรังสีลิวทิดซิลทิลเลชันแบบไม่เติมคอกเทล เปรียบเทียบกับแบบที่เติมคอกเทล ทั้งสองวิธีมีสหสัมพันธ์กันสูง คือ $r = 0.9988$

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำไคโตซานมาใช้เป็นสารเร่งการเจริญเติบโตในพืช มีดังนี้
 ทัม และคณะ (Tham et al., 2001) ศึกษาความเป็นพิษของวานิเลียมต่อพืช และอิทธิพลของไคโตซานต่อการเร่งการเจริญเติบโตของพืช รวมทั้งการลดระดับความเป็นพิษของวานิเลียมในพืช 4 ชนิด ได้แก่ ถั่วเหลือง ข้าว ข้าวสาลี และข้าวบาร์เลย์ พบว่า วานิเลียมจะมีผลต่อการงอกของเมล็ดของข้าวสาลีและข้าวบาร์เลย์สูงกว่าถั่วเหลืองและข้าว โดยจะเห็นความเป็นพิษของวานิเลียมตั้งแต่ที่ระดับความเข้มข้น 30 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร ส่วนการนำไคโตซานไปฉายรังสีในช่วงตั้งแต่ 0-200 KGy พบว่า ไคโตซานที่ฉายรังสีที่ 100 KGy จะมีคุณสมบัติในการเร่งการเจริญเติบโตของข้าวสูงที่สุด สำหรับการจะลดระดับความเป็นพิษของวานิเลียมต่อต้นพืชที่ความเข้มข้น 10 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร จะต้องใช้ไคโตซานที่ฉายรังสีที่ 100 KGy ความเข้มข้น 100-200 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร ภาพที่ 2-5 แสดงผลของไคโตซานต่อการเจริญเติบโตของข้าว



ภาพที่ 2-5 ผลของไคโตซานต่อการเจริญเติบโตของข้าว

(จากซ้าย: 1) Control 2) ไคโตซานที่ไม่ได้ฉายรังสี 3) ไคโตซานฉายรังสีที่ 20 KGy 4) ไคโตซานฉายรังสีที่ 50 KGy 5) ไคโตซานฉายรังสีที่ 100 KGy) (Tham et al., 2001)

ปิยะบุตร วานิชพงษ์พันธุ์ (2545) ศึกษาการใช้ไคโตซานเพื่อเพิ่มอัตราการงอกของเมล็ดพันธุ์พืชจำนวน 30 ชนิด โดยใช้อัตราส่วนระหว่างสารละลายของไคโตซานและน้ำต่าง ๆ กัน ได้แก่ 0:1,000 (สภาพควบคุม), 0.5:1,000, 1:1,000 และ 1:2,000 พบว่า ที่อัตราส่วน 1:1,000 แสดงผลการ

งอกของเมล็ดพันธุ์พืชทั้ง 30 ชนิดสูงกว่าที่อัตราส่วนอื่น ๆ ขณะเดียวกันระยะเวลาที่ใช้ในการงอกก็ลดลงด้วยเมื่อเทียบกับสภาพควบคุม

สิริอุปถัมภ์ (Siri-Upathum, 2002) ศึกษาการนำไคโตซานที่ตัดสายโพลิเมอร์ด้วยการฉายรังสีแกมมา มาเตรียมเป็นสารละลายที่มีความเข้มข้น 4 ระดับ ได้แก่ 25, 50, 75 และ 100 ppm และนำมาใส่ให้กับกล้วยไม้ พบว่า ทำให้อัตราการเจริญเติบโตของกล้วยไม้ดีขึ้น โดยที่ระดับความเข้มข้น 50-75 ppm เป็นระดับที่ทำให้อัตราการเจริญเติบโตสูงที่สุด

ชนัสพร เกลี้ยงเกล้า, สุวดี จันทร์กระจำ และพัลภา เสวตศิลา (2546) ศึกษาผลของสารไคโตซานที่มีผลต่อการรอดตาย และการเจริญเติบโตของกล้วยไม้สกุลรองเท้านารีลูกผสม *Paphiopedilum Bellatulum x PAPH. Angthong* ที่ได้จากการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อโดยใช้สารไคโตซาน พบว่า การใช้สารไคโตซานที่ระดับความเข้มข้น 0, 2.5, 5, 10, 20 และ 40 ppm สามารถกระตุ้นให้กล้วยไม้งอกราก เกิดใบใหม่ และกระตุ้นการเจริญเติบโตทางด้านความกว้างและความยาวของใบ เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้สารไคโตซานที่ระดับความเข้มข้น 10 ppm หลังจากให้สาร ไปแล้ว 30 วัน

ลิมนพเวช และคณะ (Limpanavech et al., 2003) ศึกษาอิทธิพลของชนิดและความเข้มข้นของไคโตซานที่มีต่อการเจริญเติบโตของกล้วยไม้ *DENDROBIUM 'EISKUL'* โดยในการศึกษาจะใช้ชนิดของไคโตซานทั้งที่เป็น Oligomer Type (70, 80, 90 % DD) และ Polymer Type (70, 80, 90 % DD) และใช้ความเข้มข้นของไคโตซานแต่ละชนิด 4 ระดับ คือ 1, 10, 50 และ 100 ppm ตามลำดับ ทำการฉีดพ่น 1 ครั้งต่อสัปดาห์ ทั้งหมด 68 สัปดาห์ พบว่า ไคโตซานมีผลต่อการเร่งการเจริญเติบโตของกล้วยไม้ *DENDROBIUM 'EISKUL'* อย่างไรก็ตาม มีความแตกต่างกันของการเร่งการเจริญเติบโต ในแต่ละชนิดและความเข้มข้นของไคโตซานที่ใช้

สุวดี จันทร์กระจำ (2546) ศึกษาการนำไคโตซานไปใช้ประโยชน์ทางด้านการเกษตร โดยไคโตซานที่ใช้มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 5,000 ถึง 80,000 ดาลตัน รวมทั้งทำการทดสอบผลของน้ำหนักโมเลกุลของไคโตซานที่มีต่อการงอกของเมล็ดพืช พบว่า ไคโตซานที่มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 40,000 ดาลตัน มีการงอกของเมล็ดดีที่สุด

สุวดี จันทร์กระจำ, เพ็ญใจ สมพงษ์ชัยกุล และสมชาย ต่วนต่าย (2546) ศึกษาผลของการใช้ไคโตซานในการปลูกพืชผักสวนครัวแบบผสมผสาน โดยปลูกพืชผักสวนครัว ได้แก่ พริก, ผักคะน้า, ผักกั้นไข่ และมะระเถ่เล็กพร้อม ๆ กันในแปลงเดียวกัน โดยมีการแบ่งพื้นที่ในแปลงเป็น 5 ส่วน เพื่อทดสอบการใช้ไคโตซานในอัตราส่วนที่ต่างกัน ตั้งแต่ 0, 3.75, 7.5, 11.25 และ 15.0 ppm ตามลำดับ การปฏิบัติทุกอย่างในแปลงเหมือนกันทุกประการ ยกเว้นแต่การใช้ไคโตซานผสมน้ำฉีดพ่นในแต่ละพื้นที่ที่กำหนดไว้ด้วยปริมาณที่ต่างกันเท่านั้น นับตั้งแต่เริ่มปลูกจนถึงการ

เก็บเกี่ยวสุดท้ายได้มีการวัดการเติบโตของต้นพริก และน้ำหนักของพืชผักเปรียบเทียบกับในแต่ละส่วน พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างเด่นชัดของการเจริญเติบโตและผลผลิตของผักในแต่ละส่วนของพื้นที่ทำการทดลองที่ใช้โคโคซานในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ซึ่งโดยทั่วไปการใช้โคโคซานจะให้ผลที่ดีกว่าการไม่ใช้โคโคซาน

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการวัดปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืชของดิน และค่าความเป็นประโยชน์ของปุ๋ยฟอสเฟตต่อพืช มีดังนี้

เซฟีโร (Shapiro, 1958 cited in De Datta, 1981, pp.124-125) ศึกษาอิทธิพลของการ Flooding ที่มีต่อปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืชของดิน ในดิน 3 ชนิด ได้แก่ ดินที่เป็น Acid Soil, Calcareous Soil และ Organic Soil โดยการบ่งชี้จากค่า A-Value พบว่า A-Value จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อดินบริเวณนั้นมีการ Flooding เกิดขึ้น

เรนนี่ และสปาร์ต (Rennie & Spratt, 1962) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่า A-Value โดยใช้การผสมปุ๋ยที่ติดป้ายด้วยไอโซโทปแบบเป็นแถบ (Band Placement) พบว่า ความชื้นของดิน ปริมาณไนโตรเจน ชนิดของปุ๋ยฟอสฟอรัส และเวลาในการเก็บตัวอย่าง ล้วนมีผลต่อค่า A-Value ทั้งสิ้น โดยหากดินมีความชื้นและปริมาณไนโตรเจนมาก จะทำให้ค่า A-Value มีค่ามากตามไปด้วย ส่วนเวลาในการเก็บตัวอย่าง พบว่า ค่า A-Value จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามช่วงเวลาในการเก็บตัวอย่างที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน อย่างไรก็ตาม การที่ปัจจัยดังกล่าวมีผลต่อค่า A-Value มีผลสืบเนื่องมาจากลักษณะการกระจายและความหนาแน่นของรากพืชเป็นสำคัญ ซึ่งปัจจัยดังกล่าวจะมีส่วนสำคัญต่อค่า A-Value ที่คำนวณได้

ดาร์มาวีจายา และซิสโวโร (Darmawijaya & Sisworo, 1979) ศึกษาอิทธิพลของช่วงเวลาการใส่ปุ๋ยและวิธีการใส่ปุ๋ยที่มีต่อการดูดซึมฟอสฟอรัส-32 โดยใช้ต้นชาเป็นพืชทดสอบ พบว่า ปริมาณฟอสฟอรัสจากปุ๋ยที่ต้นชาได้รับมีน้อยกว่า 1 % โดยช่วงเวลาที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใส่ปุ๋ย คือ ช่วงเวลาตั้งแต่เริ่มปลูกต้นชา ทั้งนี้เนื่องจากต้นชาเริ่มมีการดูดซึมฟอสฟอรัสไปใช้ ส่วนวิธีการใส่ปุ๋ยที่เหมาะสม คือ การใส่ปุ๋ยที่ระดับความลึก 10 เซนติเมตรจากผิวดิน ซึ่งจะทำให้มีอัตราการเจริญเติบโตของต้นชาสูงที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าการผสมปุ๋ยฟอสเฟตคลุกเคล้าเข้ากับดินมีผลทำให้การดูดซึมฟอสฟอรัสของพืชสูงขึ้นซึ่งจะสัมพันธ์กับลักษณะการกระจายของรากพืช

มีศักดิ์ มลิณทวิสมัย (2537) ศึกษาวิธีการประเมินธาตุฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืชของชุดดิน 3 ชุดดิน โดยใช้วิธีการสกัดฟอสฟอรัสจากดินโดยใช้สารละลายเคมี 3 แบบ วิธีวัดปริมาณการแลกเปลี่ยนฟอสฟอรัสของดินโดยใช้ฟอสฟอรัส-32 เป็นตัวติดตาม (E-Value) และวิธีวัดปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ของดินโดยการใช้ข้าวโพด และถั่วเหลืองเป็นพืชสักร่วมกับการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสซึ่งติดสลากด้วยฟอสฟอรัส-32 เป็นสารติดตาม (L-Value) นอกจากนั้นยังได้ศึกษา

เปรียบเทียบวิธีการวัดความแรงรังสีของฟอสฟอรัส-32 โดยใช้วิธีการวัดด้วยเครื่องวัดลิกวิด ซิลทิลเลชันแบบไม่เติมคอกเทลกับแบบที่เติมคอกเทล และการวัดรังสีด้วยหัววัดรังสีแบบบรรจุก๊าซ ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณฟอสฟอรัสที่สกัดได้ของดินทั้ง 3 ชนิด ที่สกัดโดยใช้สารละลายเคมี 3 แบบมีสหสัมพันธ์กันสูง สำหรับค่า E-Value สามารถนำมาใช้ในการประเมินฟอสฟอรัสของชนิดดินได้ เพียงบางชนิด (มีสหสัมพันธ์กันน้อยในบางชนิด) ส่วนค่า L-Value สามารถนำมาใช้ในการประเมิน ฟอสฟอรัสของชนิดดินทุกชนิดได้ ส่วนวิธีการวัดความแรงรังสีของฟอสฟอรัส-32 ในสารละลายสกัดดิน และสารสกัดพืช พบว่า การวัดด้วยเครื่องวัดรังสีลิกวิดซิลทิลเลชันแบบไม่เติมคอกเทล เมื่อ เปรียบเทียบกับแบบที่เติมคอกเทล และหัววัดรังสีแบบบรรจุก๊าซ พบว่า มีสหสัมพันธ์กันสูง

ภัทรวดี สุ่มทอง (2543) ศึกษาผลของเชื้อราวิเอ-อาบัสคูลาร์ ไมคอไรซา ร่วมกับปุ๋ย ฟอสเฟตระดับต่าง ๆ ที่มีต่อการเจริญเติบโตของหญ้าแฝกหอมแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี โดยใช้วิธี ทางนิวเคลียร์เทคนิค พบว่า ในการศึกษาการดูดฟอสฟอรัสในหญ้าแฝกที่ใส่เชื้อราวิเอ-ไมคอไรซา 3 ชนิด พบว่า หญ้าแฝกอายุ 2 สัปดาห์ (ภายหลังการใส่ปุ๋ยฟอสเฟต) ที่ใส่เชื้อราวิเอ-ไมคอไรซามีการ เจริญเติบโตได้ดีและมีการดูดธาตุฟอสเฟตได้สูง หญ้าแฝกที่ใส่เชื้อ *A. Scrobiculata* (ใหญ่) ร่วมกับ ปุ๋ยฟอสเฟต 60 กิโลกรัม/เฮกตาร์ พบว่า มีเปอร์เซ็นต์และปริมาณฟอสฟอรัสในหญ้าแฝก รวมทั้ง เปอร์เซ็นต์ฟอสฟอรัสที่ได้จากปุ๋ยสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองอื่น ๆ ในขณะที่หญ้าแฝก ที่ใส่ปุ๋ยฟอสเฟต 30 กิโลกรัม/เฮกตาร์ ร่วมกับเชื้อ *A. Scrobiculata* (ใหญ่) มีค่าความเป็นประโยชน์ ของปุ๋ยฟอสเฟตสูงสุด