

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำ

ฟอสฟอรัส (phosphorus) เป็นธาตุอาหารพืชที่สำคัญต่อการเจริญเติบโต และการให้ ผลผลิตของพืช ในปัจจุบันมีการใช้ปุ๋ยชนิดนี้กันอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะในสวนไม้ผล แต่เนื่องจาก ปุ๋ยฟอสฟอรัสมีราคาค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับแม่ปุ๋ยชนิดอื่นๆ และฟอสฟอรัสส่วนใหญ่ในดินอยู่ในรูปอินทรีย์ฟอสฟอรัส (organic phosphorus) ซึ่งบางรูปสามารถปลดปล่อยฟอสฟอรัสออกมาได้อย่างรวดเร็ว เช่น ฟอสโฟไลปิด (phospholipid) หรือกรดนิวคลีอิก (nucleic acid) สารประกอบฟอสฟอรัสในรูปนี้มีหมู่ฟอสเฟตเอสเทอร์ (phosphate ester) เป็นองค์ประกอบอยู่และ ละลายน้ำได้ยาก นอกจากนี้อินทรีย์ฟอสฟอรัสมากกว่าครึ่งหนึ่งของอินทรีย์ฟอสฟอรัสทั้งหมดใน ดินอยู่ในรูปอินโนซิทอลฟอสเฟต (inositol phosphate) หรือไฟติกแอซิด (phytic acid) (Tisdale et al., 1993) ส่วนปุ๋ยอินทรีย์ฟอสฟอรัสเมื่อใส่ลงไปในดิน จะเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในดิน ได้เร็วมาก และจะอยู่ในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์กับพืช เช่น การตกตะกอนกับแคลเซียมในดินต่างอยู่ ในรูปแคลเซียมฟอสเฟต (calcium phosphate) ซึ่งเป็นรูปที่ไม่ละลายน้ำ และในดินกรด ฟอสฟอรัสจะตกตะกอนกับอะลูมิเนียมและเหล็กอยู่ในรูปของอะลูมิเนียมฟอสเฟต (aluminum phosphate) และไอรอนฟอสเฟต (iron phosphate) ทำให้พืชได้รับประโยชน์จากปุ๋ยฟอสฟอรัส น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณที่ใส่ แม้ว่าใส่ลงไปในปริมาณมาก ทำให้สิ้นเปลืองโดยเปล่า ประโยชน์ โดยเฉพาะในประเทศไทย ซึ่งอยู่ในภูมิภาคเขตร้อน ดินส่วนใหญ่เป็นดินกรด (acid soil) พบประมาณ 44 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ทั้งประเทศไทย (เจริญ และคณะ, 2540) และพบ ประมาณ 51 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ภาคใต้ (เอิบ, 2533) และในบางบริเวณของประเทศไทยเป็น ดินกรดจัด (acid sulphate soil) ซึ่งมีความเป็นกรดต่างต่ำมาก ส่วนใหญ่อยู่ในพื้นที่ราบลุ่ม โดย ในพื้นที่ภาคใต้แถบจังหวัดสงขลา ปัตตานีและนราธิวาส เป็นพื้นที่ที่มีดินกรดจัดอยู่ประมาณ 7 แสนไร่ ก็จะทำให้เกิดปัญหาการขาดฟอสฟอรัสได้ และนอกจากนี้ ในดินที่มีความกรด จะมีแคด- ไอออนบางชนิดได้แก่ อะลูมิเนียม เหล็ก และแมงกานีส ละลายออกมามากจนถึงระดับที่เป็นพิษกับ พืช ซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อพืช และสิ่งมีชีวิตในดินได้

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าในดินในธรรมชาติส่วนใหญ่มีฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์ต่ำ แต่ พืชบางชนิดสามารถเจริญในบริเวณดังกล่าวได้ดี โดยไม่แสดงอาการขาดฟอสฟอรัส เช่น เสมีด โคลงเคลง หล้าเพนนิกัม กก เป็นต้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากการปรับตัวของพืช เช่น การพัฒนาของ

รากขนอ่อนให้มากขึ้นเพื่อเพิ่มพื้นที่ในการดูดฟอสฟอรัส (Poirier and Bucher, 2002) นอกจากนี้ อาจเกิดจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่อาศัยบริเวณเขตอริทิสเฟียร์ (rhizosphere) (Gyaneshwar *et al.*, 2002) เช่น การปลดปล่อยกรดอินทรีย์ เอนไซม์ หรือสารต่างๆออกมา เพื่อช่วยละลายฟอสฟอรัสในรูปต่างๆทั้งอินทรีย์ฟอสฟอรัส และอนินทรีย์ฟอสฟอรัส ซึ่งเป็นรูปที่ไม่ละลายน้ำ ทำให้ความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสเพิ่มมากขึ้น และรากพืชสามารถนำฟอสฟอรัสไปใช้ได้

ดังนั้น หากสามารถคัดเลือกจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพในการเพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสได้ เพื่อสามารถนำไปพัฒนาเพื่อเพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดิน ตลอดจนเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัส เป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยให้เกษตรกรได้ลดต้นทุนการใช้ปุ๋ยฟอสเฟต ซึ่งปัจจุบันเป็นปุ๋ยที่มีราคาสูงและต้องนำเข้าจากต่างประเทศลงได้ รวมทั้งช่วยลดปริมาณของโลหะหนักที่อาจปนเปื้อนมากับปุ๋ยฟอสเฟตได้อีกทางหนึ่ง

1.2 ตรวจเอกสาร

1.2.1 ความสำคัญของฟอสฟอรัสต่อพืช

ฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโต และการให้ผลผลิตของพืชเป็นอย่างมาก เมื่ออยู่ในเซลล์พืช จะช่วยควบคุมระดับความเป็นกรดต่าง (pH) ภายในพืช ขณะเดียวกันก็เป็นวัตถุดิบในกระบวนการสร้างสารต่างๆ โดยเฉพาะสารที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการถ่ายทอดพลังงานในพืช (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2541) เนื่องจากฟอสฟอรัสช่วยสร้างพันธะที่แข็งแกร่งเพื่อเชื่อมโมเลกุลขนาดใหญ่แต่ละหน่วยเข้าด้วยกัน (C-P-C) ทำให้โมเลกุลนั้นมีความซับซ้อนและมั่นคง และฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบของเอทีพี (adenosine triphosphate: ATP) และโคเอนไซม์ (coenzyme) หลายชนิด นอกจากนี้ ฟอสฟอรัสสามารถทำปฏิกิริยากับอินทรีย์สารได้หลายลักษณะ ได้แก่ (ยงยุทธ, 2546)

(1) ทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) ของโซ่คาร์บอนได้สารประกอบฟอสเฟตเอสเทอร์ (phosphate ester) เช่น

- น้ำตาลฟอสเฟต (sugar phosphate) ซึ่งมีบทบาทสำคัญในกระบวนการสังเคราะห์แสง
- นิวคลีโอไทด์ซึ่งเป็นองค์ประกอบของดีเอ็นเอ (DNA) และอาร์เอ็นเอ (RNA)
- ฟอสโฟลิปิด (phospholipid) ซึ่งเป็นองค์ประกอบของเยื่อหุ้มเซลล์และเยื่ออื่น ๆ

(2) เชื่อมโยงกันระหว่างอนุมูลฟอสเฟตด้วยพันธะไพโรฟอสเฟตพลังงานสูงใน ATP

(3) สร้างพันธะเคมีที่แข็งแกร่งเพื่อเชื่อมโยงโมเลกุลขนาดใหญ่แต่ละหน่วยเข้าด้วยกัน (C-P-C) เพื่อให้โมเลกุลนั้นมีความซับซ้อนและมั่นคง

1.2.2 ฟอสฟอรัสในดิน

ฟอสฟอรัสในดินโดยธรรมชาติ ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของอินทรีย์ฟอสฟอรัส (organic phosphorus) (ตารางที่ 1.1) โดยเฉพาะดินเขตร้อนอาจมีอินทรีย์ฟอสฟอรัสสูงถึง 80 เปอร์เซ็นต์ (Foth and Ellis, 1997) ซึ่งเป็นแหล่งที่จะค่อยๆปลดปล่อยฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์ออกมาให้กับพืชโดยกิจกรรมของจุลินทรีย์ดิน (Rodriguez and Fraga, 1999) ปริมาณของฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยจะขึ้นอยู่กับเนื้อดิน ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน และสภาพการใช้ประโยชน์ของพื้นที่ (Anderson, 1980) ฟอสฟอรัสในรูปอนินทรีย์ในสารละลายดินจะเปลี่ยนไปตามความเป็นกรดต่างของดิน ซึ่งฟอสฟอรัสในรูปที่พืชนำไปใช้ประโยชน์ จะอยู่ในรูปแอนไอออนของออร์โทฟอสเฟต (orthophosphate) โดยส่วนใหญ่ประกอบด้วย 2 รูป คือ ที่ความเป็นกรดต่าง 5.5–6.8 อยู่ในรูปไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (H_2PO_4^-) และหากความเป็นกรดต่างของดินเพิ่มเป็น 6.8–7.2 อยู่ในรูปของโมโนไฮโดรเจนฟอสเฟต (HPO_4^{2-})

ในดินโดยธรรมชาติ ฟอสฟอรัสรูปที่เป็นประโยชน์ในสารละลายดินมีน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดในดิน (ตารางที่ 1.2) แต่ฟอสฟอรัสในดินส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปอินทรีย์ฟอสฟอรัส ได้แก่ อินโนซิทอลฟอสเฟต (inositol phosphate) ฟอสโฟลิปิด (phospholipid) กรดนิวคลีอิก (nucleic acid) และฟอสเฟตเอสเทอร์ (phosphate ester) (Dalal, 1978) ส่วนฟอสฟอรัสในรูปอนินทรีย์ฟอสฟอรัส ส่วนใหญ่เปลี่ยนแปลงไปตามสภาพความเป็นกรดต่างของดิน หากในดินมีความเป็นกรดต่ำ จะมีเหล็กและอะลูมิเนียมในสารละลายดินสูง อินทรีย์ฟอสฟอรัสส่วนใหญ่จึงอยู่ในรูปอะลูมิเนียมฟอสเฟต และไอรอนฟอสเฟต เช่น ในดินกรดหรือดินกรดจัด แต่ในดินที่มีความเป็นกรดสูง จะมีแคลเซียมละลายออกมาในสารละลายดินมาก อินทรีย์ฟอสฟอรัสส่วนใหญ่อยู่ในรูปแคลเซียมฟอสเฟต เช่น ในดินเนื้อปูน (calcareous soil) เป็นต้น และฟอสฟอรัสบางส่วนถูกตรึงอยู่ในแร่ดินเหนียว เช่น เคโอลิไนต์ (kaolinite) มอนโมริลโลไนต์ (monmorillonite) และอิลไลต์ (illite)

ตารางที่ 1.1 ฟอสฟอรัสในสารละลายดิน (soil solution)

ชนิดดิน	อินทรีย์ฟอสฟอรัส (มก./กก.)	อินทรีย์ฟอสฟอรัส	
		มก./กก.	% ของฟอสฟอรัสทั้งหมด
ทราย	0.02	0.28	93

ร่วนปนทราย	0.12	0.57	83
ร่วนปนทรายแป้ง	0.12	0.44	79

ที่มา : Dalal (1978)

ตารางที่ 1.2 สมบัติทางเคมีบางประการของดินชุดคองหงส์ และชุดหาดใหญ่

ชุดดิน	ความลึกดิน (เซนติเมตร)	ความเป็นกรดต่าง (ดิน:โพแทสเซียมคลอไรด์ 1:5)	ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ฟอสฟอรัสทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)
คองหงส์	0-20	4.18	3.53	43
	20-40	4.25	2.24	35
	40-65	4.27	2.21	41
	65-90	4.25	0.90	41
หาดใหญ่	0-15	4.49	2.17	162
	15-35	4.16	1.04	145
	35-50	4.22	1.00	238
	50-70	4.14	0.34	224

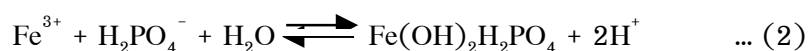
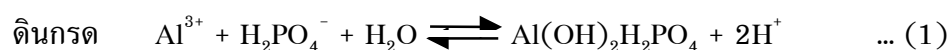
ที่มา : ดัดแปลงจาก Onthong และคณะ (1999)

1.2.3 ปัจจัยที่ควบคุมความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดิน

ความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัส (phosphorus availability) ในดิน ถูกควบคุมโดยปัจจัยต่างๆภายในดิน ดังนี้

1.2.3.1 ความเป็นกรดต่างของดิน

ความเป็นกรดต่างของดินมีผลต่อปริมาณแคตไอออนบางชนิดในดิน เช่น เหล็ก อะลูมิเนียม แมงกานีส แคลเซียม และแมกนีเซียมในดิน โดยในดินที่มีความเป็นกรดต่างต่ำ จะมีแคตไอออนของเหล็ก อะลูมิเนียม และแมงกานีสอยู่มาก หากดินมีความเป็นกรดต่างสูง จะมีแคตไอออนของแคลเซียม และแมกนีเซียมไอออนละลายออกมามาก ซึ่งฟอสฟอรัสในรูปออร์โทฟอสเฟตสามารถตกตะกอนกับแคตไอออนดังกล่าว และอยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำ ทำให้ความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสลดลง (Hemwall, 1957; van Uexkull, 1986) ดังสมการที่ 1, 2 และ 3



1.2.3.2 ปริมาณของเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์ (Fe and Al oxide) ในดิน

ปริมาณเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์ในดิน มีผลต่อความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดิน เนื่องจาก ผิวของออกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียมที่มีประจุบวกมีแรงดูดซับออร์โทฟอสเฟต สามารถเกิดพันธะทางเคมี ซึ่งในช่วงแรกฟอสฟอรัสในรูปนี้จะเป็นแหล่งสำรองที่พืชสามารถดูดใช้ได้ (labile pool) แต่เมื่อเกิดพันธะแข็งแรง ทำให้ละลายยาก พืชก็จะไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (non labile pool)

1.2.3.3 ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน

อินทรีย์วัตถุนอกจากเป็นแหล่งที่ให้ฟอสฟอรัสแก่พืชแล้ว ยังช่วยลดปฏิกิริยาของเหล็กและอะลูมิเนียมในดินที่เกิดกับออร์โทฟอสเฟตแอนไอออน โดยอินทรีย์วัตถุมีหมู่คาร์บอกซิลิก (carboxylic group) และหมู่ฟีโนลิก (phenolic group) ซึ่งเป็นแหล่งประจุลบที่สามารถดูดซับแคตไอออนดังกล่าวไว้ และมีหมู่เอมีน (amine group) ที่สามารถดูดซับออร์โทฟอสเฟตแอนไอออนไม่ให้ถูกชะล้างไปจากหน้าดิน เป็นการดูดซับอย่างหลวมๆ และพืชสามารถดูดไปใช้ประโยชน์ได้

นอกจากนี้ ในอินทรีย์วัตถุมีฟอสฟอรัสรูปอินทรีย์ เมื่อเกิดการย่อยสลายจะทำให้มีฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์สูงขึ้น และในการย่อยสลายของอินทรีย์วัตถุอาจมีการดอินทรีย์ถูกปลดปล่อยออกมา กรดอินทรีย์ทำหน้าที่เป็นคีเลต (chelate) โดยกรดอินทรีย์เป็นแอนไอออนที่จะจับกับเหล็ก และอะลูมิเนียม ป้องกันการตกตะกอนกับฟอสฟอรัส ทำให้ฟอสฟอรัสเป็นประโยชน์เพิ่มขึ้น (Dakora and Phillips, 2002; Whitelaw *et al.*, 1999)

1.2.3.4 ชนิดของแร่ดินเหนียว

แร่ดินเหนียวบางชนิด ได้แก่ เคโอลินไนต์ มอนโมริลโลไนต์ และอิลไลต์ สามารถตรึงฟอสฟอรัสได้ แร่ดังกล่าวจะทำปฏิกิริยากับไอออนฟอสเฟตโดยกระบวนการเกิดปฏิกิริยาที่ผิว (surface reaction) ซึ่งไอออนฟอสเฟตจะแทนที่หมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) ที่อยู่รอบๆผิวของแร่ดินเหนียวซิลิเกต (silicate clay mineral) จากนั้น ไอออนฟอสเฟตดังกล่าวจะทำปฏิกิริยากับอะตอมของอะลูมิเนียมหรือของเหล็กที่อยู่ในโครงสร้างของแร่ซิลิเกต ทำให้ไอออนฟอสเฟตกลายเป็นองค์ประกอบของแร่ดินเหนียว (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2541)

1.2.4 ปัญหาการขาดฟอสฟอรัส

ประเทศไทยตั้งอยู่ในพื้นที่ที่มีลักษณะแบบร้อนชื้น มีฝนตกชุก ดินมีอินทรีย์วัตถุต่ำ อีกทั้งมีการแผ่พังสลายตัวอย่างรวดเร็ว ดินมีการพัฒนามาเป็นระยะเวลายาวนาน ดินส่วนใหญ่จึงเป็นกรด (44 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ทั้งประเทศไทย (เจริญ และคณะ, 2540) และ 51 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ภาคใต้ (เอิบ, 2533)) และในบางบริเวณของประเทศไทยเป็นดินกรดจัด

(acid sulphate soil) (ประมาณ 7 แสนไร่) ส่งผลให้มีเหล็กและอะลูมิเนียมไอออนออกมาในสารละลายดินมาก ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์จึงตกตะกอนกับแคตไอออนดังกล่าว ทำให้ดินมีฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์ต่ำ อีกทั้งแร่ที่เป็นวัตถุดิบกำเนิดดินที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบมีน้อยมาก และในดินโดยทั่วไป ฟอสฟอรัสส่วนใหญ่อยู่ในรูปอินทรีย์ฟอสฟอรัส ดังนั้นฟอสฟอรัสส่วนใหญ่จึงได้มาจากอินทรีย์วัตถุ สำหรับในดินโดยทั่วไปในประเทศไทยมีอินทรีย์วัตถุค่อนข้างต่ำ ทำให้ฟอสฟอรัสทั้งหมดโดยรวมในดินมีค่อนข้างน้อย โดย สุทิน (2535) อ้างโดย จำเป็น (2547) ได้กำหนดระดับการวิเคราะห์ฟอสฟอรัสในดินโดยใช้วิธีเบรย์ทู (Bray II method) โดยในดินที่มีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์ต่ำกว่า 8 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ถือว่ามีฟอสฟอรัสต่ำ จำเป็นต้องใส่เพิ่มลงไป

พืชโดยทั่วไปต้องการฟอสฟอรัส 0.3–0.5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักแห้ง เพื่อให้การเจริญเติบโตในระยะพัฒนาภาค (vegetative stage) เป็นไปตามปกติ หากพืชขาดฟอสฟอรัส จะมีการกระจายคาร์โบไฮเดรต (carbohydrate) ไปยังส่วนรากมากขึ้น ทำให้รากสามารถเจริญเติบโตต่อไป ในขณะที่ส่วนเหนือดินหยุดการเจริญเติบโตไปแล้ว พฤติกรรมนี้เป็นการรักษาสภาพให้รากมีความสามารถในการหาธาตุอาหารที่ขาดแคลนเพิ่มเติม (Smith *et al.*, 1990) โดยพืชที่ขาดฟอสฟอรัสมีการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญ 2 ประการ คือ 1) ใบขยายขนาดช้า ทำให้ใบมีขนาดเล็ก และ 2) จำนวนใบน้อย (Fredeen *et al.*, 1989 อ้างโดย ยงยุทธ, 2546) สาเหตุที่แผ่นใบมีการขยายขนาดช้า เพราะเซลล์ชั้นผิวไม่ค่อยขยายตัว เนื่องจาก 1) เซลล์ชั้นผิวมีฟอสฟอรัสต่ำ และ 2) สภาพนำน้ำของราก (root hydraulic conductivity) ลดลง อย่างไรก็ตาม แม้ว่าการขยายขนาดของใบลดลงอย่างมาก แต่ปริมาณโปรตีนและคลอโรฟิลล์ต่อหน่วยพื้นที่ใบลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องจากขนาดใบลดลงมากกว่าการลดลงของคลอโรฟิลล์ จึงทำให้พืชที่ขาดฟอสฟอรัสในระยะแรกมีสีเขียวเข้ม แต่เมื่อพิจารณาอัตราการสังเคราะห์แสงต่อหน่วยคลอโรฟิลล์ พบว่ามีค่าลดลง ในขณะที่ Barry และ Miller (1989) รายงานว่า การขาดฟอสฟอรัสของพืช จะมีผลกระทบต่อเจริญพันธุ์อย่างมาก เช่น ออกดอกช้า จำนวนดอก ผล และเมล็ดน้อยลง ใบเสื่อมสภาพตามอายุและร่วงเร็วกว่าปกติ

1.2.5 บทบาทของจุลินทรีย์ต่อความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัส

จุลินทรีย์ดินบางชนิด สามารถช่วยเพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดินให้แก่พืชได้ โดยจุลินทรีย์เหล่านี้จะอาศัยบริเวณรากพืช ซึ่งรากพืชจะปลดปล่อยสารประกอบบางชนิดออกมา และเป็นประโยชน์ต่อการเจริญเติบโตและกิจกรรมของจุลินทรีย์ดิน (ตารางที่ 1.3) จุลินทรีย์แต่ละชนิดจะผลิตสารต่างๆ เพื่อช่วยละลายฟอสฟอรัส (Rodriguez and Fraga, 1999) ซึ่งแต่ละชนิดสามารถเจริญและทำงานได้ดีในสภาพแวดล้อมดินที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดอาหาร และสมบัติของดินในบริเวณนั้นๆ

ตารางที่ 1.3 สารประกอบอินทรีย์และเอนไซม์ต่างๆ ที่รากพืชปลดปล่อยออกมา

Amino acids	Organic acids	Sugars	Vitamins	Purines/ Nucleosides	Enzymes	Inorganic ion and gaseous molecules
α -alanine	citric	glucose	biotin	adenine	acid/alkaline-	HCO_3^-
β -alanine	oxalic	fructose	thiamin	guanine	phosphatase	OH^-
asparagine	malic	galactose	niacin	cytidine	invertase	CO_2
aspartate	fumalic	maltose	pantothenates	uridine	amylase	H_2
cystein	succinic	ribose			protease	
cystine	acetic	xylose				
glutamate	butyric	rhamnose				
glycine	valeric	arabinose				
isoleucine	glycolic	raffinose				
leucine	piscidic	de soxyribose				
lysine	formic	oligosaccharide				
methionine	aconitic					
serine	lactic					
threonine	pyruvic					
proline	glutaric					
valine	malonic					
tryptophan	aldonic					
ornithine	erythronic					
histidine	tetronic					
arginine						
homoserine						
phenylalanine						
γ -Aminobutyric acid						
α -Aminoadipic acid						

หมายเหตุ พืชที่ใช้ศึกษาได้แก่ ต้นแฟลกซ์ ข้าวบาร์เลย์ ข้าวสาลี ข้าวโอ๊ต แดงกวา มะเขือเทศ
พริกชี้ฟ้า กะหล่ำปลี ถั่วงอก ถั่วเหลือง ถั่วเขียว turnip chickpea lupin alfalfa slash
pine และ repe

ที่มา : Dakora และ Phillips (2002)

1.2.5.1 จุลินทรีย์ในดินกรดหรือดินกรดจัด

จุลินทรีย์ดินที่เจริญในดินกรดจัดนั้นมีอยู่ในปริมาณน้อย เนื่องจากในสภาพดินกรดจัด เป็นดินที่มีความเป็นกรดต่างต่ำ และยังมีไอออนของอะลูมิเนียม เหล็ก และแมงกานีส ละลายออกมามากจนอาจถึงระดับที่เป็นพิษ ทำให้มีจุลินทรีย์ดินเพียงไม่กี่ชนิดที่สามารถเจริญได้ในสภาพเช่นนี้ โดยส่วนใหญ่แล้ว จุลินทรีย์ดินที่สามารถเจริญเติบโตได้ในสภาพดินกรดจัด จะมีกลไกในการปรับตัวให้ทนต่อสภาพที่มีความเป็นกรดต่างต่ำๆ โดยจุลินทรีย์บางชนิด มีกลไกที่จะรักษาความเป็นกรดต่างภายในเซลล์ให้สูงกว่าความเป็นกรดต่างของดินโดยรอบ เพื่อป้องกันไม่ให้ไฮโดรเจนไอออนเป็นพิษต่อเซลล์ (Sylvia *et al.*, 2005) นอกจากนี้ จุลินทรีย์ยังมีกลไกที่ช่วยลดความเป็นพิษของแคตไอออน ที่อาจเป็นพิษต่อเซลล์ของจุลินทรีย์ โดยเฉพาะกลไกในการต้านทานความเป็นพิษของอะลูมิเนียมพบว่า มีทั้งการที่จุลินทรีย์ดูดเอาอะลูมิเนียมไปไว้ในเซลล์ แล้วอะลูมิเนียมไปจับกับโปรตีนบางชนิดเปลี่ยนเป็นรูปที่ไม่เป็นพิษ หรืออาจสะสมไว้ในส่วนของแวคคูลโอล หรือจุลินทรีย์ดินมีการปลดปล่อยสารบางชนิดออกมา เช่น กรดอินทรีย์ หรือเอนไซม์บางชนิดมาตกตะกอนกับอะลูมิเนียมที่อยู่รอบเซลล์ เปลี่ยนเป็นรูปที่ไม่เป็นพิษต่อเซลล์ (Jo *et al.*, 1997) ทำให้มีจุลินทรีย์เพียงบางชนิดเท่านั้นที่จะสามารถเจริญเติบโตได้ในดินกรดจัด ส่วนใหญ่จึงมักพบว่าจุลินทรีย์ในดินกรดจัดจะมีปริมาณน้อยกว่าดินปกติ

1.2.5.2 การเพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสโดยกรดอินทรีย์

จุลินทรีย์หลายชนิดที่สามารถผลิตกรดอินทรีย์ได้ เช่น กรดกลูโคนิก (gluconic acid) กรดซิตริก (citric acid) กรดออกซาลิก (oxalic acid) กรดมาลิก (malic acid) เป็นต้น กรดอินทรีย์จะช่วยปลดปล่อยฟอสฟอรัสออกมาจากอนินทรีย์ฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำ ให้อยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ เนื่องจากกรดอินทรีย์อยู่ในกลุ่มของแอนไอออน ซึ่งจะไปจับกับแคตไอออน เช่น อะลูมิเนียม เหล็ก และแคลเซียม เป็นต้น ทำให้แคตไอออนเหล่านี้ไม่ตกตะกอนกับฟอสเฟตไอออน (Dakora and Phillips, 2002) และโดยส่วนใหญ่แล้ว จุลินทรีย์สามารถสังเคราะห์กรดอินทรีย์ออกมาได้ (Fenice *et al.*, 2000; Vazquez *et al.*, 2000; Reyes *et al.*, 1999; Rodriguez and Fraga, 1999; Gyaneshwar *et al.*, 2002; Toro *et al.*, 1997) ซึ่งกรดอินทรีย์ที่จุลินทรีย์ผลิตออกมาส่วนใหญ่จะเป็นกรดกลูโคนิก (ตารางที่ 1.4)

Vassilev และคณะ (2001) ได้ใช้แบคทีเรีย *Penicillium variabile* ละลายหินฟอสเฟต และตรวจวัดปริมาณกรดอินทรีย์ พบว่า เชื้อจุลินทรีย์สามารถละลายหินฟอสเฟตได้ โดยฟอสฟอรัสที่ละลายออกมามีความสัมพันธ์กับการปลดปล่อยกรดกลูโคนิก

Illmer และคณะ (1995) ได้รายงานว่ ปริมาณฟอสฟอรัสที่ละลายออกมาจากอะลูมิเนียมฟอสเฟต โดยใช้เชื้อรา *Aspergillus niger* มีความสัมพันธ์กับปริมาณกรดซิตริก ที่เชื้อผลิตออกมา

Reddy และคณะ (2002) ได้ทดลองการละลายหินฟอสเฟตชนิดต่างๆ ในอาหารเหลว โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งเป็นเชื้อรา 5 ชนิด คือ *Aspergillus tubingensis* 3 สายพันธุ์ (AT1 AT2 และ AT3) และ *A. niger* 2 สายพันธุ์ (AN1 และ AN2) ใช้ละลายหินฟอสเฟต 5 ชนิด ซึ่งเป็นหินฟอสเฟตแบบไตรแคลเซียมฟอสเฟต (tricalcium phosphate) ซึ่งเป็นหินฟอสเฟตที่ละลายได้ค่อนข้างยาก พบว่า เชื้อราสายพันธุ์ AT1 สามารถละลายหินฟอสเฟตทุกชนิดได้ดี เนื่องจากเชื้อราผลิตกรดอินทรีย์ออกมา

Whitelaw และคณะ (1999) ได้นำเชื้อรา *Penicillium radicum* ไปทดสอบการละลายฟอสฟอรัสในอาหารเหลว ซึ่งมีแหล่งฟอสฟอรัสในรูปแคลเซียมฟอสเฟต 2 ชนิด คือ แคลเซียมโมโนไฮโดรเจนฟอสเฟต (CaHPO_4) และแคลเซียมออร์โทฟอสเฟต ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) และอะลูมิเนียมฟอสเฟต (AlPO_4) และในอาหารแต่ละสูตรใช้ในโตรเจน 2 รูป คือ แอมโมเนียม (NH_4^+) และไนเตรต (NO_3^-) พบว่า เชื้อราดังกล่าวสามารถผลิต กรดกลูโคนิก และสามารถละลายฟอสฟอรัสออกมาได้ โดยเฉพาะในสูตรอาหารที่มีไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียม เชื้อราสามารถละลายฟอสฟอรัสได้ดีกว่าอาหารที่ใช้แหล่งไนโตรเจนในรูปของไน-เทรต (ตารางที่ 1.5) ทั้งนี้เนื่องจากจุลินทรีย์สามารถดูดแอมโมเนียม และนำไปใช้ในกระบวนการเมแทบอลิซึม (metabolism) ได้ทันที หากจุลินทรีย์ใช้ในโตรเจนในรูปของไนเตรต จะต้องมีกระบวนการรีดิวซ์ (reduction) ไนเตรตมาเป็นแอมโมเนียมก่อน จากนั้นจึงเข้าสู่กระบวนการเมแทบอลิซึมต่อไป ซึ่ง Whitelaw และคณะ (1999) ได้ทำการทดลองต่อไป โดยใช้กรดกลูโคนิกแทนจุลินทรีย์ใส่ลงในอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีฟอสฟอรัส 3 รูปเช่นเดียวกับข้างต้น และใช้กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ปรับความเป็นกรดต่างเท่ากับค่าความเป็นกรดต่างขณะที่เลี้ยงเชื้อ พบว่ามีฟอสฟอรัสละลายออกมาใกล้เคียงกับที่เชื้อละลายออกมา

ตารางที่ 1.4 การผลิตกรดอินทรีย์ของจุลินทรีย์

จุลินทรีย์	กรดอินทรีย์	อ้างอิง
<i>Azospirillum</i> spp.	gluconic	Rodriguez และคณะ (2004)
<i>Penicillium rugulosm</i>	gluconic, citric	Reyes และคณะ (2001)
<i>Yarrowia lipolytica</i>	citric	Vassileva และคณะ (2000)
<i>Penicillium radicum</i>	gluconic	Whitelaw และคณะ (1999)
<i>Rahnella aquatilis</i>	gluconic	Kim และคณะ (1998)
<i>Aspergillus niger</i>	gluconic	Moksia และคณะ (1996)
<i>Pseudomonas cepacia</i>	gluconic	Babu-Khan และคณะ (1995)
<i>Aspergillus niger</i>	gluconic, oxalic, citric	Illmer และคณะ (1995)
<i>Tricholoma robustum</i>	gluconic	Iwase (1992)

ตารางที่ 1.5 การละลายฟอสฟอรัสในรูป แคลเซียมโมโนไฮโดรเจนฟอสเฟต และแคลเซียมออร์โทฟอสเฟต และอะลูมิเนียมฟอสเฟตในอาหารเหลวโดยเชื้อ *Penicillium radicum*

แหล่งฟอสฟอรัส	แหล่งไนโตรเจน	เวลา (วัน)	ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัมของฟอสฟอรัสต่อลิตร)	ความเป็นกรดต่าง	กรดที่ไทเทรตได้ (มิลลิโมลของไฮโดรเจนต่อลิตร)
CaHPO ₄	NH ₄ ⁺	6	475	3.4	29
CaHPO ₄	NO ₃ ⁻	5	176	4.6	12
Ca ₃ (PO ₄) ₂	NH ₄ ⁺	14	360	4.1	23
Ca ₃ (PO ₄) ₂	NO ₃ ⁻	31	213	4.5	20
Colloid AlPO ₄	NH ₄ ⁺	14	207	2.7	24
Colloid AlPO ₄	NO ₃ ⁻	31	46	4.1	6

ที่มา : ดัดแปลงจาก Whitelaw และคณะ (1999)

1.2.5.3 การเพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสโดยเอนไซม์

จุลินทรีย์บางชนิดสามารถผลิตเอนไซม์ เพื่อเพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัส ได้แก่ เอนไซม์ในกลุ่มฟอสฟาเทส (phosphatase) หรือที่เรียกว่า ฟอสโฟไฮโดรเลส (phosphohydrolase) โดยหากมีกิจกรรมได้ดีในสภาพที่เป็นกรดจะเรียกเอนไซม์ชนิดนี้ว่า แอซิดฟอสฟาเทส (acid phosphatase) หากมีกิจกรรมได้ดีในสภาพที่เป็นด่างจะเรียกว่า อัลคาไลน์ฟอสฟาเทส (alkaline phosphatase) ซึ่งเอนไซม์ฟอสฟาเทสเข้าไปละลายฟอสฟอรัสในรูปอินทรีย์ฟอสเฟต โดยการสลายพันธะของ C-P ในออร์แกนโนฟอสเฟต (organophosphonate) ของสารประกอบอินทรีย์ฟอสฟอรัส ทำให้อนุมูลฟอสเฟตถูกปลดปล่อยออกมา (Yadav and Tarafdar, 2001; Hayes *et al.*, 2000; Magboul and McSweeney, 1998; Hysek and Sarapatka, 1998; Marschner, 1991) เอนไซม์ในกลุ่มนี้มีชื่อเรียกแตกต่างกันไปตามสารตั้งต้นที่เอนไซม์สามารถช่วยให้เกิดการปลดปล่อยฟอสฟอรัส เช่น เอนไซม์ฟอสโฟโมโนเอสเทอร์เลส และฟอสโฟไดเอสเทอร์เลส ซึ่งช่วยปลดปล่อยฟอสเฟตที่จับอยู่กับหมู่โมโนเอสเทอร์ และไดเอสเทอร์ ในสารประกอบอินทรีย์ฟอสฟอรัส เช่น ฟอสโฟไลปิด และกรดนิวคลีอิก และเอนไซม์ฟิเทสหรือไมโออินโนซิทอลเฮกซะฟอสเฟตฟอสโฟไฮโดรเลส (phytase หรือ myo-inositol hexaphosphate phosphohydrolase) ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการแปรสภาพอินโนซิทอลฟอสเฟต ซึ่งเป็นรูปของอินทรีย์ฟอสฟอรัสที่พบมากที่สุดที่ดิน ให้ออกมาเป็นหมู่ของอินโนซิทอลและหมู่ของฟอสเฟตที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ต่อไป (Sarapatka, 2003) เอนไซม์ในกลุ่มแอซิด-ฟอสฟาเทส พบได้ในเนื้อเยื่อของพืช สัตว์ เชื้อรา และแบคทีเรีย โดยเอนไซม์เหล่านี้จะมีการปลดปล่อยออกมาภายนอกเซลล์ และเอนไซม์ที่ผลิตขึ้นโดยจุลินทรีย์มีบทบาทต่อความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารมากกว่าจากแหล่งของสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ ในดิน เนื่องจากจุลินทรีย์ดินมีวงจรชีวิตสั้น

และมีปริมาณอยู่มากในดิน ทำให้การผลิตและปลดปล่อยเอนไซม์จึงเกิดขึ้นได้มากกว่า (Sarapatka, 2003)

Tarafdar และคณะ (2001) ได้ทำการทดลองเลี้ยง *Aspergillus niger* *A. terreus* และ *A. rugulosus* ในอาหารที่มีอินทรีย์ฟอสฟอรัส 3 รูป คือ ฟิเทต (phytate), เลซิ-ดิน (lecithin) และ ไกลเซอโรฟอสเฟต (glycerophosphate) พบว่า เชื้อจุลินทรีย์มีกิจกรรมของเอนไซม์แอสิดฟอสฟาเทส สามารถละลายฟอสฟอรัสออกมาได้ และกิจกรรมของเอนไซม์มีความสัมพันธ์กับฟอสฟอรัสที่ถูกปลดปล่อยออกมา ในขณะที่ Yadav และ Tarafda (2003) ได้นำเชื้อรา 3 จีนิส ที่มีกิจกรรมของเอนไซม์แอสิดฟอสฟาเทส ได้แก่ *Aspergillus Emmericella* และ *Penicillium* จำนวน 7 ชนิด คือ *A. niger* Van Tiegh *A. niger* group *A. awamori* *E. nidulans* *E. rugulosa* *P. simplicissimum* และ *P. rubrum* พบว่าจุลินทรีย์ดังกล่าวสามารถละลายฟอสฟอรัสในรูปอินทรีย์ฟอสฟอรัสในรูป ฟิเทต และไกลเซอโรฟอสเฟตได้ดี

Turner และ Haygarth (2005) ได้รายงานว่ กิจกรรมของเอนไซม์ฟอสโฟไดเอสเทอเรส (phosphodiesterase) และปริมาณอินทรีย์ฟอสฟอรัสในดิน จะมีความสัมพันธ์กัน โดยกิจกรรมของเอนไซม์เพิ่มขึ้นตามความเป็นกรดต่างที่เพิ่มขึ้นจาก 4 ถึง 7 และปริมาณอินทรีย์ฟอสฟอรัสในดินก็จะลดลง และ Hayes และคณะ (2000) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของเอนไซม์ฟิเทส (phytase) ของเชื้อรา *Aspergillus niger* เปรียบเทียบกับเอนไซม์ฟิเทสที่มีขายในเชิงการค้า โดยบ่มกับอินทรีย์ฟอสฟอรัส พบว่า ตำรับการทดลองที่มีกิจกรรมของเอนไซม์ฟิเทส มีฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์ออกมามากกว่าชุดควบคุมที่ไม่มีการใช้จุลินทรีย์และเอนไซม์ โดยเอนไซม์ที่มีขายในเชิงการค้าสามารถละลายฟอสฟอรัสออกมามากที่สุด เนื่องจากเอนไซม์มีความบริสุทธิ์สูง

นอกจากนี้ มีรายงานว่ แบคทีเรียหลายชนิดสามารถผลิตเอนไซม์เพื่อละลายฟอสฟอรัสได้ ได้แก่ *Bacillus* sp. *Bacillus amyloliquefaciens* *Bacillus subtilis* *Enterobacter* sp. *Escherichia coli* *Klebsiella terrigena* *Pseudomonas* sp. *Megasphaera elsdenii* *Mitsuokella multiacidus* *Prevotella ruminicola* *Selenomonas ruminantium* และ *Treponema* sp. เป็นต้น (Vats and Banerjee, 2004) และ Pengnoo (2005) ได้รายงานว่ มีเชื้อ *Ustilago* sp. มีกิจกรรมของเอนไซม์แอสิดฟอสฟาเทสค่อนข้างสูง ซึ่งสอดคล้องกับสายใจ (2006) ได้รายงานว่ เชื้อ *Ustilago* sp. AR101 และ AR102 มีกิจกรรมเอนไซม์แอสิดฟอส-ฟาเทสสูงถึง 3,690 และ 956 นาโนโมลต่อนาทีต่อมิลลิตร ตามลำดับ

อย่างไรก็ตาม ถ้าจุลินทรีย์ดินอาศัยอยู่ในบริเวณที่มีฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์อย่างเพียงพอ พบว่กิจกรรมของเอนไซม์ในกลุ่มแอสิดฟอสฟาเทสในบริเวณนั้นลดลง จากการศึกษาของ Gargova และ Sariyska (2003) โดยเลี้ยงเชื้อรา *Aspergillus niger* ในอาหารที่มีฟอสฟอรัสในรูปไดโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (di-potassium hydrogen phosphate; K_2HPO_4) อยู่ในระดับ 0-40 มิลลิกรัมเปอร์เซ็นต์ของฟอสฟอรัส และนำมาทดสอบ

กิจกรรมของเอนไซม์แอซิดฟอสฟาเทส และชั่งน้ำหนักแห้งของเส้นใยเชื้อราหลังจากเลี้ยงไว้เป็นเวลา 7 วัน พบว่ากิจกรรมของเอนไซม์แอซิดฟอสฟาเทสลดลงเมื่อความเข้มข้นของฟอสฟอรัสสูงกว่า 20 มิลลิกรัม ในขณะที่น้ำหนักแห้งของเส้นใยเชื้อราเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเลี้ยงในอาหารที่มีฟอสฟอรัสสูงขึ้น แต่ไม่มีความแตกต่างกันมากนัก

1.2.5.3 การใช้จุลินทรีย์ที่ช่วยเพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสกับพืช

Tarafdar และ Claassen (1988) ได้ศึกษาการละลายฟอสฟอรัสโดยเอนไซม์แอซิดฟอสฟาเทสในดินที่ปลูกพืช 4 ชนิด คือ ถั่วโคลเวอร์ (clover) ข้าวบาร์เลย์ ข้าวโอ๊ต และข้าวสาลี โดยปลูกพืชในดิน และมีการเติมอินทรีย์ฟอสฟอรัสในรูปเลซิทิน (lecitin) โซเดียมกลีเซอโรฟอสเฟต (sodium glycerophosphate) และไฟเฟต จำนวน 20 มิลลิกรัมต่อดิน 100 กรัม พบว่าในการทำการทดลองที่ใส่อินทรีย์ฟอสฟอรัส จะมีเชื้อราและแบคทีเรียเพิ่มมากขึ้น มีกิจกรรมเอนไซม์แอซิดฟอสฟาเทสเพิ่มขึ้น มีน้ำหนักแห้งต้นพืชเพิ่มขึ้น และฟอสฟอรัสทั้งหมดในพืชทุกชนิดเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับสิ่งทดลองที่ไม่ใส่อินทรีย์ฟอสฟอรัส แสดงให้เห็นว่า จุลินทรีย์มีส่วนช่วยในการปลดปล่อยฟอสฟอรัส โดยการเพิ่มกิจกรรมเอนไซม์แอซิดฟอสฟาเทสในดิน

Shibata และ Yano (2003) ได้ทดสอบการใช้เชื้อราไมคอร์ไรซา (mycorrhiza) ร่วมกับถั่วลิสง (peanut) ถั่วเขียว (pigeonpea) และถั่วเหลือง (soybean) เทียบกับการไม่ใช้เชื้อ พบว่า การทำการทดลองที่มีการใช้เชื้อรา พืชทดสอบเจริญเติบโตและสามารถดูดฟอสฟอรัสได้ดีกว่าการทดลองที่ไม่ใช้เชื้อรา นอกจากนี้ Shibata และ Yano (2003) ได้ทดลองใช้ไมคอร์ไรซากับถั่วลิสง และถั่วเขียว โดยใส่ฟอสฟอรัสในรูปที่พืชไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ 3 รูป คือ แคลเซียมไฟเฟต ไอรอนฟอสเฟต และอะลูมิเนียมฟอสเฟต พบว่า การทำการทดลองที่ใช้เชื้อรา ต้นพืชเจริญเติบโตได้ดีกว่าการทดลองที่ไม่ใช้เชื้อรา แสดงว่า เชื้อราสามารถช่วยในการเพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสได้

Kim และคณะ (1998) ใช้เชื้อราวิเอไมคอร์ไรซา (vesicular-arbuscular mycorrhiza) คือ *Glomus etunicatum* ร่วมกับแบคทีเรียที่มีความสามารถในการละลายฟอสฟอรัส (phosphate-solubilizing bacteria) คือ *Enterobacter agglomerans* ในการปลูกมะเขือเทศ พบว่า การทำการทดลองที่ใช้จุลินทรีย์ทั้ง 2 ชนิด ทำให้มะเขือเทศมีน้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง และความเข้มข้นของฟอสฟอรัสทั้งหมดในพืชมากกว่าการทดลองที่ไม่ใช้เชื้อจุลินทรีย์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

Vassileva และคณะ (1999) ได้ทดลองใช้เชื้อ *Enterobacter* sp. ที่สามารถผลิตกรดอินทรีย์ได้ร่วมกับแอบัสคูลาร์ไมคอร์ไรซา (arbuscular-mycorrhiza) กับต้นผักกาดหอม พบว่า ในการทำการทดลองที่ใช้เชื้อร่วมกัน จะทำให้มีน้ำหนักแห้งของต้นผักกาดหอมสูงสุด และมีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในต้นผักกาดหอมสูงสุด

Caravaca และคณะ (2003) ได้ทดลองใช้เชื้อราไมคอร์ไรซา *Glomus deserticola* ร่วมกับเชื้อรา *Aspergillus niger* หินฟอสเฟต และเศษพืชชูการ์บีท (sugar beet) ซึ่งเป็นวัสดุปรับปรุงดิน ทำให้มีฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน และมีฟอสฟอรัสทั้งหมดในพืชเพิ่มขึ้นมากกว่าการทดลองอื่นๆ ในขณะที่ Marschner และ Timonen (2005) รายงานว่า การใช้เชื้อราไมคอร์ไรซา *G. intraradices* และ *G. versiforme* ในพืชคาโนลา (canola) ถั่วโคลเวอร์ (clover) และมะเขือเทศ 2 สายพันธุ์ พบว่า การทดลองที่ใช้เชื้อรา จะทำให้พืชมีน้ำหนักแห้งสูงกว่าการทดลองควบคุม (ไม่ใช้เชื้อรา) นอกจากนี้ Kumar และคณะ (2001) ได้ทดลองปลูกข้าวสาลีในสภาพเรือนกระจก โดยใช้ *Azobacter choococcum* ร่วมกับปุ๋ยฟอสเฟต เปรียบเทียบกับชุดควบคุม (ไม่ใช้เชื้อจุลินทรีย์) พบว่า การทดลองที่ใช้เชื้อจุลินทรีย์ทำให้ผลผลิตข้าวสาลี และน้ำหนักตอสูงขึ้น ส่วน Abdel-Fattah (2001) ได้ทดสอบใช้เชื้อแอสคูลาร์ไมคอร์ไรซา 4 ชนิด คือ *Glomus intraradices* *G. fasciculatum* *G. monosporum* และ *G. mosseae* ซึ่งเป็นชนิดที่มีกิจกรรมเอนไซม์ฟอสฟาเทส โดยทดสอบกับต้นถั่วเหลือง พบว่า ในการทดลองที่ใช้เชื้อรา ทำให้น้ำหนักแห้งของถั่วเหลืองสูงกว่าการทดลองที่ไม่ใช้เชื้อรา

Freitas และคณะ (1997) ได้ทดลองปลูกคาโนลา โดยเปรียบเทียบระหว่างการใช้น้ำฟอสเฟต ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต และการใช้เชื้อแบคทีเรียที่มีกิจกรรมเอนไซม์แอซิดฟอสฟาเทสค่อนข้างสูงจำนวน 7 ชนิด คือ *Bacillus megaterium* *B. sphaericus* *B. brevis-1* *B. polymyxa* *B. brevis-1* *B. thuringiensis* และ *Xanthomonas maltophilia* พบว่า มีแนวโน้มของการสะสมฟอสฟอรัสในเมล็ด น้ำหนักฝัก และน้ำหนักเมล็ดคาโนลาในสิ่งทดลองที่ใช้จุลินทรีย์สูงกว่าในสิ่งทดลองควบคุม และสิ่งทดลองที่ใช้หินฟอสเฟต แต่น้อยกว่าสิ่งทดลองที่ใช้ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต ส่วน Mar Vazquez และคณะ (2000) ได้ทดลองใช้เชื้อราแอสคูลาร์ไมคอร์ไรซา ร่วมกับจุลินทรีย์ปฏิปักษ์ที่ช่วยยับยั้งเชื้อสาเหตุที่ทำให้เกิดโรคพืชบริเวณราก 3 จินัส คือ *Azospirillum* *Pseudomonas* และ *Trichoderma* ในการปลูกข้าวโพด พบว่า เชื้อจุลินทรีย์สามารถเจริญร่วมกันได้ และทำให้น้ำหนักแห้งของข้าวโพดสูงกว่าการทดลองที่ใช้เชื้อราไมคอร์ไรซา หรือจุลินทรีย์ปฏิปักษ์ควบคุมโรคพืชเพียงอย่างเดียว ในขณะที่ Tarafdar และ Gharu (2006) ได้ทดลองใช้เชื้อ *Chaetomium globosum* ที่สามารถผลิตเอนไซม์แอซิดฟอสฟาเทส ไปทดสอบกับการปลูกข้าวฟ่าง พบว่า การใช้เชื้อจุลินทรีย์ร่วมกับการปลูกข้าวฟ่าง ทำให้อายุข้าวฟ่างมีผลผลิต และมีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในพืชสูงกว่าการทดลองที่ไม่ใช้เชื้อจุลินทรีย์

จากที่ได้กล่าวมา จะเห็นว่าการใช้เชื้อจุลินทรีย์เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของฟอสฟอรัส สามารถช่วยเพิ่มฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์แก่ดินและพืชได้ และช่วยป้องกันไม่ให้ฟอสฟอรัสไปตกตะกอนกับธาตุประจุบวกอื่นๆ ดังนั้น การศึกษาถึงเชื้อจุลินทรีย์เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของฟอสฟอรัส จึงเป็นแนวทางเลือกอีกทาง ที่จะช่วยลดการใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัสซึ่งมีราคาแพงได้

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.3.1 เพื่อคัดเลือกจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพในการเพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัส และทนต่อสภาพความเป็นกรดได้ดี

1.3.2 ทดสอบประสิทธิภาพของเชื้อจุลินทรีย์ ตลอดจนปัจจัยต่างๆ เช่น ความเป็นกรดต่าง และแคตไอออนบางชนิดต่อความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในห้องปฏิบัติการ

1.3.3 ทดสอบการใช้เชื้อจุลินทรีย์เพื่อเพิ่มการดูดใช้ฟอสฟอรัสของพืชทดสอบ