

ผลของความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดินต่อประสิทธิภาพ  
ของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซา *Glomus intraradices*  
Effect of Available Phosphorus in Soil on Efficiency of  
Arbuscular Mycorrhizal Fungi, *Glomus intraradices*

พัชกรเพ็ญ ภูมิพันธ์\*, สุภาพร สัมโย และประสพโชค รื่นสุข

สาขาวิชาเทคโนโลยีการเกษตร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

ปวีณา ทองเหลือง

ศูนย์วิจัยข้าวโพดและข้าวฟ่างแห่งชาติ คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ถนนมิตรภาพ ตำบลกลางดง อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา 30320

นัทธรา ทักขรัตน์ศรีณย์

สำนักงานพัฒนาที่ดินเขต 1 กรมพัฒนาที่ดิน

ตำบลลำผักกูด อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

Phakpen Poomipan\*, Supaporn Sammayo and Prasopchok Reunsuk

Department of Agricultural Technology, Faculty of Science and Technology,

Thammasat University, Rangsit Centre, Khlong Nueng, Khlong Luang, Pathum Thani 12120

Paweena Thongluang

National Corn and Sorghum Research Center, Faculty of Agriculture, Kasetsart University,

Mitrapap Road, Klang Dong, Pakchong, Nakhon Ratchasima 30320

Natta Takrattanasaran

Land Development Regional 1, Land Development Department,

Lam Pak Kood, Thanyaburi, Pathum Thani, 12110

---

## บทคัดย่อ

การศึกษามูลของความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดินต่อประสิทธิภาพของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซา *Glomus intraradices* ประกอบด้วย 2 การทดลอง ได้แก่ การทดลองที่ 1 เพื่อศึกษามูลของระดับความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดินต่อประสิทธิภาพของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซา โดยวางแผนการทดลองแบบ 3x2 factorials in CRD จำนวน 5 ซ้ำ ประกอบด้วย ปัจจัยที่ 1 ดินที่มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์แตกต่างกัน (ต่ำ

ปานกลาง สูง) และปัจจัยที่ 2 การไม่ใส่และใส่ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซา *G. intraradices* ปลุกข้าวโพดโดยใส่ปุ๋ยเคมีตามคำแนะนำ แต่ไม่ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาต่อการเจริญเติบโต ผลผลิต และการดูดซับฟอสฟอรัส รวมทั้งการเข้าอยู่อาศัยของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาในรากสูงที่สุดในดินที่มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่ำ และต่ำที่สุดในดินที่มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์สูง การทดลองที่ 2 เพื่อศึกษาผลของปุ๋ยฟอสฟอรัสต่อประสิทธิภาพของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซา โดยวางแผนการทดลองแบบ 3x2 factorials in CRD จำนวน 5 ซ้ำ ประกอบด้วย ปัจจัยที่ 1 การใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส ได้แก่ ไม่ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสครึ่งอัตรา และใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสเต็มอัตราตามคำแนะนำ และปัจจัยที่ 2 การไม่ใส่และใส่ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซา *G. intraradices* ทดลองในดินที่มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ระดับต่ำและปานกลาง ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาต่อการเจริญเติบโต ผลผลิต และการดูดซับฟอสฟอรัส รวมทั้งการเข้าอยู่อาศัยของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาในรากสูงที่สุดเมื่อไม่ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสและใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสครึ่งอัตรา แต่จะมีประสิทธิภาพต่ำเมื่อใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสเต็มอัตรา ดังนั้นผลการทดลองนี้จึงชี้ให้เห็นว่าความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดินมีผลต่อประสิทธิภาพของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซา โดยราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาจะมีประสิทธิภาพสูงที่สุดเมื่อใส่ในดินที่มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่ำ และเมื่อใส่รวมกับการไม่ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสหรือใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสครึ่งอัตราของคำแนะนำ แต่จะมีประสิทธิภาพต่ำเมื่อใส่ในดินที่มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์สูงหรือเมื่อใส่รวมกับการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสเต็มอัตรา

**คำสำคัญ :** ความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดิน; ปุ๋ยฟอสฟอรัส; ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซา

## Abstract

Study on the effect of available phosphorus (P) in soil on efficiency of arbuscular mycorrhizal (AM) fungi, *Glomus intraradices* consisted of 2 experiments. The experiment 1 was to study effect of available P level in soil on efficiency of AM fungi. It was conducted in 3x2 factorial in CRD with 5 replications. Factor 1 was different levels of available P in soil (low, medium and high). Factor 2 was AM fungi (with or without). Corn was grown with chemical fertilization at the recommendation rate without applying P fertilizer. The results showed that efficiency of AM fungi on growth, yield and P uptake of corn and AM colonization were highest in soil with low level of available P. However, efficiency of AM fungi on growth, yield and P uptake of corn and AM colonization were lowest in soil with high level of available P. The experiment 2 was to study effect of the P fertilizer rate on efficiency of AM fungi. It was conducted in 3x2 factorial in CRD with 5 replications. Factor 1 was P fertilization; nil P, half rate of P fertilizer and recommendation rate of P fertilizer. Factor 2 was AM fungi (with or without). The results showed that efficiency of AM fungi on growth, yield and P uptake of corn and AM colonization were highest when no P fertilizer and P fertilizer applying at half rate, but the efficiency and AM colonization were lowest when P fertilizer applying at the recommendation rate. Therefore, these results indicated that available P in soil affected the

efficiency of AM fungi. The highest of efficiency of AM fungi was shown in low available P in soil and no P fertilizer applying or at half rate of P fertilizer. In contrast, the lowest efficiency of AM fungi was shown in high available P in soil or P fertilizer applying at the recommendation rate.

**Keywords:** available P in soil; P fertilizer; arbuscular mycorrhizal fungi

## 1. บทนำ

ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซามีการดำรงชีวิตอยู่ในสภาพแวดล้อม 2 แบบ คือ ทั้งในดินและในรากพืช กล่าวคือ เส้นใยรานอกรากพืชที่แพร่กระจายในดินจะทำหน้าที่ดูดธาตุอาหารจากดิน แล้วลำเลียงมาสู่เส้นใยราในรากพืชเพื่อแลกเปลี่ยนกับสารประกอบอินทรีย์คาร์บอนที่พืชส่งให้แก่รา ดังนั้นเส้นใยราจึงเป็นส่วนสำคัญของความสัมพันธ์แบบพึ่งพาอาศัยระหว่างราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซากับพืช และเป็นส่วนที่ทำหน้าที่เสมือนเป็นตัวกลางที่ทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายธาตุอาหารจากดินมาสู่พืช โดยประโยชน์ของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาต่อพืชที่สำคัญที่สุด คือ การเพิ่มการดูดซับธาตุอาหารจากดินให้กับพืช โดยเฉพาะธาตุฟอสฟอรัส [1]

เนื่องจากฟอสฟอรัสเป็นธาตุที่เคลื่อนย้ายได้น้อยมากในระบบท่อลำเลียงของพืช และยังเป็นธาตุที่มีการแพร่ได้ช้ามากในดิน นอกจากนี้ฟอสฟอรัสมักอยู่ในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ต่อพืช เช่น เหล็กฟอสเฟต แคลเซียมฟอสเฟต อะลูมิเนียมฟอสเฟต ซึ่งเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ละลายน้ำยาก จึงทำให้สถานะความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดินต่ำ ดังนั้นพืชจึงมีโอกาสดูดธาตุฟอสฟอรัสได้มาก [2,3] พืชสามารถดูดซับธาตุฟอสฟอรัสได้ในรูป orthophosphate จึงเรียกฟอสฟอรัสในรูปนี้ว่าฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืช (available phosphorus) โดยราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาสามารถดูดซับฟอสฟอรัสในรูปนี้ได้เช่นเดียวกับการดูดซับฟอสฟอรัสของพืชจะเกิดขึ้นโดยการดูดซับผ่านทางเซลล์ชั้น epidermis และรากขนอ่อน (root

hair) แต่อัตราการเคลื่อนย้ายฟอสฟอรัสในดินเป็นไปอย่างช้า ๆ ทำให้บริเวณรอบ ๆ ราก มีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่ำมาก (depletion zone) ทั้งนี้เนื่องจากการดูดซับโดยรากเกิดขึ้นเร็วกว่าการเคลื่อนย้ายของฟอสฟอรัสในดิน อย่างไรก็ตาม พืชที่มีราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาเข้าอยู่อาศัยในรากจะได้รับฟอสฟอรัสจากดินมากขึ้น โดยผ่านกลไกการดูดซับฟอสฟอรัสของเส้นใยรานอกรากพืชที่สามารถเจริญแพร่กระจายออกไปนอก depletion zone รอบรากขนอ่อน จึงทำให้สามารถดูดซับฟอสฟอรัสในบริเวณที่อยู่ห่างออกไปจากราก แล้วลำเลียงกลับเข้ามาในโครงสร้างแลกเปลี่ยนธาตุอาหารของรากที่อยู่ในเซลล์ชั้น cortex ในรากพืชได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นอัตราการเคลื่อนย้ายฟอสฟอรัสในดินจึงไม่เป็นปัจจัยจำกัดการดูดซับฟอสฟอรัสของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซา จึงมักพบว่าพืชที่มีราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาเข้าอยู่อาศัยในราก ได้รับฟอสฟอรัสมากกว่าพืชที่ไม่มีราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาเข้าอยู่อาศัยในราก [4]

อย่างไรก็ตาม บางกรณีพบว่าการใส่ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาให้กับพืชไม่แสดงผลตอบสนองในทางบวกต่อพืช [5-9] ตัวอย่าง เช่น การศึกษาของ Smith และคณะ [10] พบว่าพืชที่มีราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาเข้าอยู่อาศัยในรากมีการดูดซับฟอสฟอรัสไม่ต่างกับพืชที่ไม่มีราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาในราก ซึ่งมักจะมีความเกี่ยวข้องกับระดับความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดิน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ประเมินผลของความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดินทั้งในกรณีที่ดินมีระดับความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสต่างกัน

และในกรณีของการใส่ปุ๋ยเพื่อเพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสที่มีต่อประสิทธิภาพของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซา *Glomus intraradices* ทั้งนี้เพื่อใช้เป็นแนวทางในการนำราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซามาใช้กับพืชได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## 2. อุปกรณ์และวิธีการ

### 2.1 การศึกษาผลของระดับความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดินต่อประสิทธิภาพของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซา

วางแผนการทดลองแบบ 3x2 factorials in CRD จำนวน 5 ซ้ำ ประกอบด้วย 2 ปัจจัยศึกษา ได้แก่ ปัจจัยที่ 1 ดินที่มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่างกัน ได้แก่ ดินที่มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่ำ (ชุดดินมาบอน) ปานกลาง (ชุดดินปากช่อง) และสูง (ชุดดินโคราชที่มีการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยอินทรีย์) ซึ่งสมบัติของดินแสดงในตารางที่ 1 และ

ปัจจัยที่ 2 การไม่ใส่และใส่ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซา *G. intraradices*

การเตรียม soil inocula โดยเก็บตัวอย่างดินมาแยกสปอร์ตามวิธี wet sieving and decanting method และ sucrose centrifugation method [11] เลือกสปอร์ของ *G. intraradices* เพื่อเพิ่มปริมาณโดยใช้ข้าวฟ่างเป็นพืชอาศัย เป็นเวลา 60 วัน จึงใช้ดินปลูกข้าวฟ่างเป็น soil inocula ซึ่งมีจำนวนสปอร์ 30 สปอร์/ดินหนึ่งกรัม โดยชุดการทดลองที่มีการใส่ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาจะใส่ soil inocula 50 กรัม/กระถาง ส่วนชุดการทดลองที่ไม่ใส่ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาใส่ดินที่ใช้เตรียม soil inocula 50 กรัม/กระถาง

การเตรียมดินโดยเก็บดินที่ระดับความลึก 0-20 เซนติเมตร แล้วนำดินมาฟุ้งให้แห้งในที่ร่ม แยกเศษพืชออก เตรียมดินให้มีขนาดสม่ำเสมอ คลุกเคล้าให้เข้ากันดี แล้วจึงนำตัวอย่างดินมาอบในตู้อบไอรอนที่

**Table 1** Soil properties of Mabbon, Pak Chong and Korat soil series

Soil properties	Soil series		
	Mabbon	Pak Chong	Korat
	Low available P in soil	Medium available P in soil	High available P in soil
Soil texture <sup>1</sup>	loam	clay	sandy loam
pH <sup>2</sup>	4.50	4.37	4.30
Soil organic matter (%) <sup>3</sup>	0.78	1.95	4.32
Total phosphorus (mg/kg) <sup>4</sup>	56.85	228.33	174.24
Available phosphorus (mg/kg) <sup>5</sup>	7	18	50
Extractable potassium (mg/kg) <sup>6</sup>	12	42	67
Extractable calcium (mg/kg) <sup>6</sup>	78	1,423	130
Extractable magnesium (mg/kg) <sup>6</sup>	43	140	21
Cation exchangeable capacity (cmol/kg) <sup>7</sup>	3.31	20.13	12.56

<sup>1</sup>pipette method; <sup>2</sup>Soil : H<sub>2</sub>O = 1 : 1; <sup>3</sup>Walkley-Black method; <sup>4</sup>vanadate-molybdate method; <sup>5</sup>Bray II, ascorbic method; <sup>6</sup>KH<sub>4</sub>OAc, pH 7.0; <sup>7</sup>1 M NH<sub>4</sub>OAc pH 7.0 method

อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง เพื่อกำจัดสปอร์ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาในดิน จากนั้นแบ่งบรรจุดิน 10 กิโลกรัม/กระถาง และใส่ soil inocula ตามแผนการทดลอง ปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์พันธุ์สุวรรณ 4452 จำนวน 1 ต้น/กระถาง

การใส่ปุ๋ยเคมีตามคำแนะนำของโปรแกรมปุ๋ยสั่งตัด ดังนี้ ชุดดินมาบบอนใส่ปุ๋ยไนโตรเจนอัตรา 16 กิโลกรัม/ไร่ และปุ๋ยโพแทสเซียมอัตรา 9 กิโลกรัม/ไร่ ชุดดินปากช่องใส่ปุ๋ยไนโตรเจนอัตรา 16 กิโลกรัม/ไร่ และปุ๋ยโพแทสเซียมอัตรา 6 กิโลกรัม/ไร่ และชุดดินโคราชชุดดินโคราชที่มีการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยอินทรีย์ จะไม่มีการใส่ปุ๋ย เนื่องจากมีปริมาณธาตุอาหารและปริมาณอินทรีย์วัตถุในระดับสูง อย่างไรก็ตาม จะไม่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส ทั้งนี้เนื่องจากต้องการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับฟอสฟอรัสของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซา

การบันทึกผลการทดลอง ได้แก่ (1) การเจริญเติบโต (น้ำหนักแห้งทั้งหมด) (2) ผลผลิตต่อไร่ โดยคำนวณจากน้ำหนักแห้งฝักของข้าวโพดที่ปลูกด้วยระยะปลูก 75x20 เซนติเมตร ในพื้นที่ 1 ไร่ (3) ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดที่ดูดซับได้ โดยวิเคราะห์ด้วยวิธี vanadate-molybdate yellow color [12] (4) การคำนวณเปอร์เซ็นต์การพึ่งพาราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซา (AM dependency) หรือประสิทธิภาพของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาต่อการเจริญเติบโต ผลผลิต และการดูดซับฟอสฟอรัสของข้าวโพด โดยวิธีการคำนวณของ Plenchette และคณะ [13] และ (5) การประเมินการเข้าอยู่อาศัยของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาในราก โดยวิธีของ Philips และ Hayman [14] และ McGonigle และคณะ [15] จากนั้นนำข้อมูลมาวิเคราะห์ความแปรปรวนและเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

## 2.2 การศึกษาผลของปุ๋ยฟอสฟอรัสต่อประสิทธิภาพของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซา

วางแผนการทดลองแบบ 3x2 factorials in CRD จำนวน 5 ซ้ำ ประกอบด้วย 2 ปัจจัยศึกษา ได้แก่ ปัจจัยที่ 1 อัตราปุ๋ยฟอสฟอรัส 3 อัตรา ได้แก่ ไม่ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสครึ่งอัตรา และใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสเต็มอัตราที่แนะนำโดยโปรแกรมปุ๋ยสั่งตัด และ ปัจจัยที่ 2 การไม่ใส่และใส่ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซา *G. intraradices* โดยทดลองในดินที่มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ระดับต่ำ (ชุดดินมาบบอน) และดินที่มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ระดับปานกลาง (ชุดดินปากช่อง)

การเตรียม soil inocula การเตรียมดิน การใส่ปุ๋ย การบันทึกผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลทางสถิติ ใช้วิธีการเดียวกันกับการทดลองที่ 1 แต่การใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสมีความแตกต่างกันตามชุดดิน ซึ่งจากการคำนวณโดยใช้โปรแกรมปุ๋ยสั่งตัด พบว่าชุดดินปากช่องและชุดดินมาบบอนต้องใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 3 และ 4 กิโลกรัม ( $P_2O_5$ ) ต่อไร่ ตามลำดับ

## 3. ผลการวิจัย

การศึกษาผลของระดับความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดินต่อประสิทธิภาพของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซา พบว่าราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซามีประสิทธิภาพต่อการเจริญเติบโตของข้าวโพดสูงที่สุดเมื่อใส่ในดินที่มีระดับความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดินต่ำ กล่าวคือ เมื่อใส่ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาจะมีผลทำให้น้ำหนักแห้งทั้งหมดของข้าวโพด  $74.9 \pm 4.1$  กรัม/ต้น ซึ่งมากกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับที่ไม่ใส่ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซา ( $25.7 \pm 2.3$  กรัม/ต้น) โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาต่อการเจริญเติบโตของข้าวโพด  $192 \pm 8$  รองลงมา คือ การใส่

ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาในดินที่มีระดับความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดินปานกลาง โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาต่อการเจริญเติบโตของข้าวโพด  $141 \pm 5$  และต่ำที่สุด คือ การใส่ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาในดินที่มีระดับความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดินสูง โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาต่อการเจริญเติบโตของข้าวโพด  $5 \pm 1$  เช่นเดียวกับกับประสิทธิภาพต่อผลผลิตข้าวโพด พบว่าราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซามีประสิทธิภาพต่อผลผลิตของข้าวโพดสูงที่สุดเมื่อใส่ในดินที่มีระดับความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดินต่ำ กล่าวคือ เมื่อใส่ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาจะมีผลทำให้น้ำหนักแห้งฝักต่อไร่  $162 \pm 13$  กิโลกรัม/ไร่ ซึ่งมากกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับการไม่ใส่ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซา ( $0 \pm 0$  กิโลกรัม/ไร่) โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาต่อผลผลิตของข้าวโพด  $162 \pm 6$  รองลงมา คือ การใส่ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาในดินที่มีระดับความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดินปานกลาง โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาต่อผลผลิตของข้าวโพด  $137 \pm 7$  และต่ำที่สุด คือ การใส่ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาในดินที่มีระดับความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดินสูง โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาต่อผลผลิตของข้าวโพด  $2 \pm 0.3$  นอกจากนี้ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซามีประสิทธิภาพต่อการดูดซับฟอสฟอรัสของข้าวโพดสูงที่สุดเมื่อใส่ในดินที่มีระดับความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดินต่ำเช่นเดียวกัน กล่าวคือ เมื่อใส่ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาจะมีผลทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดในข้าวโพด  $0.024 \pm 0.03$  กรัม/ต้น ซึ่งมากกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับการไม่ใส่ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์

ไรซา ( $0.005 \pm 0.03$  กรัม/ต้น) โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาต่อการดูดซับฟอสฟอรัสของข้าวโพด  $380 \pm 11$  รองลงมา คือ การใส่ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาในดินที่มีระดับความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดินปานกลาง โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาต่อการดูดซับฟอสฟอรัสของข้าวโพด  $100 \pm 5$  และต่ำที่สุด คือ การใส่ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาในดินที่มีระดับความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดินสูง โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาต่อการดูดซับฟอสฟอรัสของข้าวโพด  $7 \pm 1$  (ตารางที่ 2)

การศึกษาผลของปุ๋ยฟอสฟอรัสต่อประสิทธิภาพของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาในดินที่มีระดับความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสระดับต่ำ พบว่าราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซามีประสิทธิภาพต่อการเจริญเติบโตของข้าวโพดสูงที่สุดเมื่อใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสครั้งอัตราของคำแนะนำจากโปรแกรมปุ๋ยสั่งตัด กล่าวคือ เมื่อใส่ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาจะมีผลทำให้น้ำหนักแห้งทั้งหมดของข้าวโพด  $80.4 \pm 3.2$  กรัม/ต้น ซึ่งมากกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับการไม่ใส่ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซา ( $27.2 \pm 1.8$  กรัม/ต้น) โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาต่อการเจริญเติบโตของข้าวโพด  $196 \pm 6$  ซึ่งไม่แตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับ การใส่ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาร่วมกับการไม่ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาต่อการเจริญเติบโตของข้าวโพด  $192 \pm 8$  และต่ำที่สุด คือ การใส่ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาร่วมกับการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสเต็มอัตราของคำแนะนำจากโปรแกรมปุ๋ยสั่งตัด โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาต่อการเจริญเติบโตของข้าวโพด  $2 \pm 1$  เช่นเดียวกับกับประสิทธิภาพต่อผลผลิต

**Table 2** Effects of available P level in soil (soil P) and AM fungi (AM) on growth, yield and P content in corn

Level of available P in soil (soil P)	AM fungi (AM)	Growth of corn		Yield of corn		P content in corn	
		Total dry weight of corn (g/plant)	Efficiency of AM fungi on growth (%)	Dry weight of cob (kg/rai)	Efficiency of AM fungi on yield (%)	Total P content in corn (g/plant)	Efficiency of AM fungi on P uptake (%)
Low	without AM	25.7±2.3 <sup>e 1/</sup>	192±8 <sup>a</sup>	0±0 <sup>e</sup>	162±6 <sup>a</sup>	0.005±0.03 <sup>d</sup>	380±11 <sup>a</sup>
	with AM	74.9±4.1 <sup>c</sup>		162±13 <sup>c</sup>		0.024±0.03 <sup>b</sup>	
Medium	without AM	38.5±6.1 <sup>d</sup>	141±5 <sup>b</sup>	119±19 <sup>d</sup>	137±7 <sup>b</sup>	0.016±0.02 <sup>c</sup>	100±5 <sup>b</sup>
	with AM	93.0±5.3 <sup>b</sup>		283±22 <sup>b</sup>		0.032±0.06 <sup>b</sup>	
High	without AM	113.3±7.5 <sup>a</sup>	5±1 <sup>c</sup>	471±11 <sup>a</sup>	2±0.3 <sup>c</sup>	0.042±0.05 <sup>a</sup>	7±1 <sup>c</sup>
	with AM	118.7±9.9 <sup>a</sup>		479±27 <sup>a</sup>		0.045±0.02 <sup>a</sup>	
p-value							
Soil P		<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
AM		<0.001		<0.001		<0.001	
Soil P*AM		<0.001		<0.001		<0.001	

<sup>1/</sup>mean±standard deviation in column with the same letter did not significant difference at p-value < 0.05 by DMRT

ของข้าวโพด พบว่าราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซามีประสิทธิภาพ ต่อผลผลิตของข้าวโพดสูงที่สุดเมื่อใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสครึ่งอัตราของคำแนะนำจากโปรแกรมปุ๋ยสั่งตัด กล่าวคือ เมื่อใส่ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาจะมีผลทำให้น้ำหนักแห้งฝักต่อไร่ 174±8 กิโลกรัม/ไร่ ซึ่งมากกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับ การไม่ใส่ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซา (0±0 กิโลกรัม/ไร่) โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาต่อการเจริญเติบโตของข้าวโพด 174±5 ซึ่งไม่แตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับ การใส่ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาร่วมกับการไม่ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาต่อผลผลิตของข้าวโพด 162±6 และต่ำที่สุด คือ การใส่ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาร่วมกับการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสเต็มอัตราของคำแนะนำจากโปรแกรมปุ๋ยสั่งตัด โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาต่อผลผลิตของข้าวโพด 2±0

อย่างไรก็ตาม ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซามีประสิทธิภาพ ต่อการดูดซับฟอสฟอรัสของข้าวโพดสูงที่สุดเมื่อไม่ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส กล่าวคือ เมื่อใส่ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาจะมีผลทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสในข้าวโพด 0.024±0.03 กรัม/ต้น ซึ่งมากกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับ การไม่ใส่ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซา (0.005±0.03 กรัม/ต้น) โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาต่อการดูดซับฟอสฟอรัสของข้าวโพด 380±11 รองลงมา คือ การใส่ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาร่วมกับการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสครึ่งอัตราของคำแนะนำจากโปรแกรมปุ๋ยสั่งตัด โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาต่อการดูดซับฟอสฟอรัสของข้าวโพด 188±6 และต่ำที่สุด คือ การใส่ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาร่วมกับการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสเต็มอัตราของคำแนะนำจากโปรแกรมปุ๋ยสั่งตัด โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซา

ไรซาดต่อการดูดซับฟอสฟอรัสของข้าวโพด  $20 \pm 2$  (ตารางที่ 3)

การศึกษาผลของปุ๋ยฟอสฟอรัสต่อประสิทธิภาพของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาในดินที่มีระดับความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสระดับปานกลางพบว่าราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซามีประสิทธิภาพต่อการเจริญเติบโตของข้าวโพดสูงที่สุดเมื่อใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสครึ่งอัตราของคำแนะนำจากโปรแกรมปุ๋ยสั่งตัด กล่าวคือ เมื่อใส่ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาจะมีผลทำให้น้ำหนักแห้งทั้งหมดของข้าวโพด  $100.8 \pm 6.4$  กรัม/ต้น ซึ่งมากกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับการไม่ใส่ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซา ( $37.8 \pm 7.3$  กรัม/ต้น) โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาต่อการเจริญเติบโตของข้าวโพด  $167 \pm 8$  รองลงมา คือ การใส่ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาร่วมกับการไม่ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไร

ซาต่อการเจริญเติบโตของข้าวโพด  $141 \pm 5$  และต่ำที่สุดคือ การใส่ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาร่วมกับการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสเต็มอัตราของคำแนะนำจากโปรแกรมปุ๋ยสั่งตัด โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาต่อการเจริญเติบโตของข้าวโพด  $15 \pm 3$  อย่างไรก็ตาม ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซามีประสิทธิภาพต่อผลผลิตของข้าวโพดสูงที่สุดเมื่อไม่ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส กล่าวคือ เมื่อใส่ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาจะมีผลทำให้น้ำหนักแห้งฝักต่อไร่  $283 \pm 22$  กิโลกรัม/ไร่ ซึ่งมากกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับการไม่ใส่ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซา ( $119 \pm 19$  กิโลกรัม/ไร่) โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาต่อผลผลิตของข้าวโพด  $137 \pm 7$  ซึ่งไม่มีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับ การใส่ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาร่วมกับใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสครึ่งอัตราของคำแนะนำจากโปรแกรมปุ๋ยสั่งตัด โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาต่อผลผลิตของข้าวโพด  $141 \pm 5$  และต่ำที่สุดคือ การใส่ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาร่วมกับการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสเต็มอัตราของคำแนะนำจากโปรแกรมปุ๋ยสั่งตัด โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาต่อผลผลิตของข้าวโพด  $15 \pm 3$

**Table 3** Effects of P fertilizer and AM fungi (AM) on growth, yield and P content in corn growing on low available P in soil

Rate of P fertilizer	AM fungi (AM)	Growth of corn		Yield of corn		P content in corn	
		Total dry weight (g/plant)	Efficiency of AM fungi on growth (%)	Dry weight of cob (kg/rai)	Efficiency of AM fungi on yield (%)	Total P content (g/plant)	Efficiency of AM fungi on P uptake (%)
0 %	without AM	25.7±2.3 <sup>c 1/</sup>	192±8 <sup>a</sup>	0±0 <sup>b</sup>	162±6 <sup>a</sup>	0.005±0.03 <sup>c</sup>	380±11 <sup>a</sup>
	with AM	74.9±4.1 <sup>a</sup>		162±13 <sup>a</sup>		0.024±0.03 <sup>a</sup>	
50 %	without AM	27.2±1.8 <sup>c</sup>	196±6 <sup>a</sup>	0±0 <sup>b</sup>	174±5 <sup>a</sup>	0.008±0.02 <sup>c</sup>	188±6 <sup>b</sup>
	with AM	80.4±3.2 <sup>a</sup>		174±8 <sup>a</sup>		0.023±0.05 <sup>a</sup>	
100 %	without AM	64.2±1.1 <sup>b</sup>	2±1 <sup>c</sup>	166±4 <sup>a</sup>	2±0 <sup>b</sup>	0.015±0.01 <sup>b</sup>	20±2 <sup>c</sup>
	with AM	65.3±5.3 <sup>b</sup>		170±8 <sup>a</sup>		0.018±0.02 <sup>b</sup>	
P value							
P fertilizer		<0.001	0.001	0.001	<0.001	<0.001	<0.001
AM		<0.001		<0.001		<0.001	
P fertilizer*AM		<0.001		0.012		<0.001	

<sup>1/</sup>mean±standard deviation in column with the same letter did not significant difference at p-value < 0.05 by DMRT



**Table 4** Effects of P fertilizer and AM fungi (AM) on growth, yield and P content in corn growing on medium available P in soil

Rate of P fertilizer (P fertilizer)	AM fungi (AM)	Growth of corn		Yield of corn		P content in corn	
		Total dry weight (g/plant)	Efficiency of AM fungi on growth (%)	Dry weight of cob (kg/rai)	Efficiency of AM fungi on yield (%)	Total P content (g/plant)	Efficiency of AM fungi on P uptake (%)
0 %	without AM	38.5±6.1 <sup>c 1/</sup>	141±5 <sup>b</sup>	119±19 <sup>c</sup>	137±7 <sup>a</sup>	0.016±0.02 <sup>c</sup>	100±5 <sup>a</sup>
	with AM	93.0±5.3 <sup>a</sup>		283±22 <sup>a</sup>		0.032±0.03 <sup>a</sup>	
50 %	without AM	37.8±7.3 <sup>c</sup>	167±8 <sup>a</sup>	132±15 <sup>c</sup>	127±10 <sup>a</sup>	0.018±0.02 <sup>c</sup>	83±7 <sup>b</sup>
	with AM	100.8±6.4 <sup>a</sup>		300±18 <sup>a</sup>		0.033±0.05 <sup>a</sup>	
100 %	without AM	54.6±10.1 <sup>b</sup>	15±3 <sup>c</sup>	180±10 <sup>b</sup>	3±1 <sup>b</sup>	0.025±0.02 <sup>b</sup>	4±1 <sup>c</sup>
	with AM	62.2±6.8 <sup>b</sup>		185±14 <sup>b</sup>		0.026±0.03 <sup>ab</sup>	
P value							
P fertilizer		<0.001	<0.001	<0.001	0.001	<0.001	<0.001
AM		<0.001		0.001		<0.001	
P fertilizer*AM		<0.001		<0.001		<0.001	

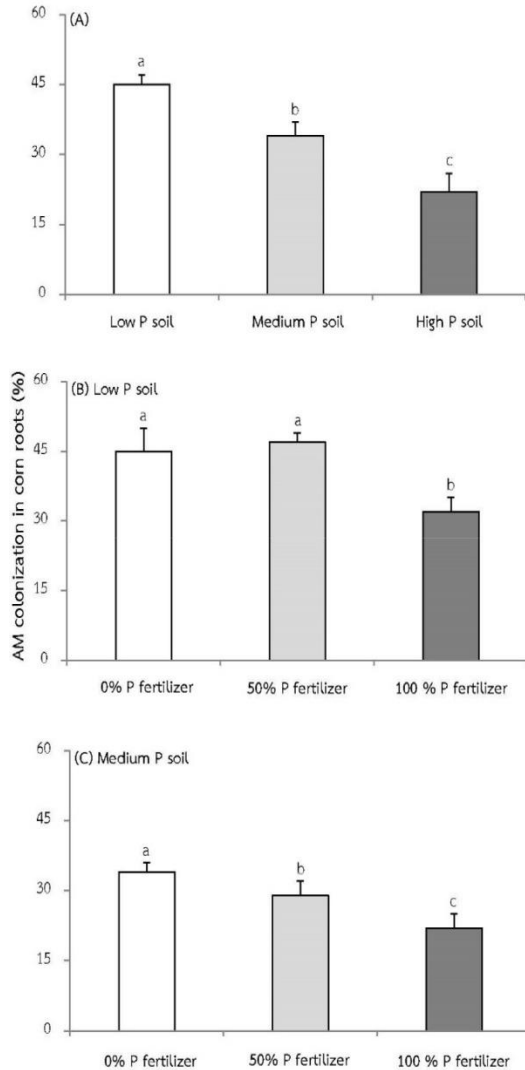
<sup>1/</sup>mean±standard deviation in column with the same letter did not significant difference at p-value < 0.05 by DMRT

ลาร์ไมคอร์ไรซาต่อผลผลิตของข้าวโพด 127±10 และต่ำที่สุด คือ การใส่ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซา ร่วมกับ การใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสเต็มอัตราของคำแนะนำจากโปรแกรมปุ๋ยสั่งตัด โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาต่อผลผลิตของข้าวโพด 3±1 นอกจากนี้ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซามีประสิทธิภาพต่อการดูดซับฟอสฟอรัสของข้าวโพดสูงที่สุดเมื่อไม่ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส กล่าวคือ เมื่อใส่ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาจะมีผลทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดในข้าวโพด 0.032±0.03 กรัม/ต้น ซึ่งมากกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับ การไม่ใส่ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซา (0.016±0.02 กรัม/ต้น) โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาต่อการดูดซับฟอสฟอรัส 100±5 รองลงมา คือ การใส่ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซา ร่วมกับ ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสครึ่งอัตราของคำแนะนำจากโปรแกรมปุ๋ยสั่งตัด โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาต่อ

การดูดซับฟอสฟอรัส 83±7 และต่ำที่สุด คือ การใส่ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซา ร่วมกับ การใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสเต็มอัตราของคำแนะนำจากโปรแกรมปุ๋ยสั่งตัด โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาต่อการดูดซับฟอสฟอรัส 4±1 (ตารางที่ 4)

การเข้าอยู่อาศัยของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาในรากข้าวโพดน้อยที่สุดในดินที่มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์สูงและในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสเต็มอัตรา กล่าวคือ การเข้าอยู่อาศัยของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาในรากข้าวโพดน้อยที่สุดในดินที่มีระดับความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสสูง 22±4 เปอร์เซ็นต์ รองลงมา คือ ในดินที่มีระดับความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสปานกลาง 34±3 เปอร์เซ็นต์ และการเข้าอยู่อาศัยของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาในรากข้าวโพดมากที่สุด ในดินที่มีระดับความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสต่ำ 45±2 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 1A) ส่วนผลของการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสอัตราต่าง ๆ ในดิน

ของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาในรากข้าวโพดลดลง โดยมีการเข้าอยู่อาศัยของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาในรากข้าวโพด  $32 \pm 3$  เปอร์เซ็นต์ ซึ่งน้อยกว่าอย่างมี



**Figure 1** AM colonization in roots of corn that growing on difference level of available P in soil (A) and AM colonization in roots of corn that growing on low (B) and medium (C) available P soil with 3 rate of P fertilizer

นัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบกับการใส่ปุ๋ยครั้งที่ มีระดับความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสต่อการเข้าอยู่อาศัยของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซา พบว่าการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสเต็มอัตราามีผลทำให้การเข้าอยู่อาศัย อัตราและการไม่ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส โดยมีการเข้าอยู่อาศัยของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาในรากข้าวโพด  $47 \pm 2$  และ  $45 \pm 5$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (รูปที่ 1B) เช่นเดียวกับผลของการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสอัตราต่าง ๆ ในดินที่มีระดับความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสปานกลาง พบว่าการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสเต็มอัตราามีผลทำให้การเข้าอยู่อาศัยของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาในรากข้าวโพดน้อยที่สุด โดยมีการเข้าอยู่อาศัยของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาในรากข้าวโพด  $21 \pm 3$  เปอร์เซ็นต์ รองลงมา คือ การใส่ปุ๋ยครั้งอัตรา และมากที่สุดเมื่อไม่ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส โดยมีการเข้าอยู่อาศัยของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาในรากข้าวโพดที่ปลูกร่วมกับการใส่ปุ๋ยครั้งอัตราและการไม่ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส  $29 \pm 3$  และ  $34 \pm 4$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (รูปที่ 1C)

#### 4. วิจารณ์

ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซามีประสิทธิภาพสูงที่สุดเมื่อใส่ในดินที่มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่ำ รองลงมา คือ ดินที่มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ปานกลาง และมีประสิทธิภาพต่ำที่สุดเมื่อใส่ในดินที่มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์สูง สอดคล้องกับผลของการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสอัตราต่าง ๆ ต่อประสิทธิภาพของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซา โดยพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินด้วยการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสเต็มอัตรา [16-19] มีผลทำให้ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซามีประสิทธิภาพต่ำกว่าเมื่อไม่ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสหรือใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสครั้งอัตรา ดังนั้นจะเห็นได้ว่าราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาจะมีประสิทธิภาพสูงในดินที่มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็น

ประโยชน์ต่ำและปานกลาง หรือเมื่อไม่ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส และใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสครั้งอัตรา แต่จะมีประสิทธิภาพต่ำ ในดินที่มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์สูงหรือใส่ ปุ๋ยฟอสฟอรัสเต็มอัตรา ทั้งนี้อาจเนื่องจากการ ดำรงชีวิตแบบพึ่งพาอาศัยของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซากับรากพืช ทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายธาตุอาหาร แบบ 2 ทาง โดยพืชให้น้ำตาลแก่รา ส่วนราช่วยเพิ่ม ประสิทธิภาพการดูดซับธาตุอาหารโดยเฉพาะธาตุ ฟอสฟอรัสให้กับพืช [20] ดังนั้นพืชที่มีราอาร์บัสคูลาร์ ไมคอร์ไรซาเข้าอยู่อาศัยในราก จึงสามารถดูดซับธาตุ ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินในรูป ortho-phosphate ผ่านทางราก (direct uptake pathway) และผ่านทางเส้นใยรา (AM uptake pathway) ซึ่งโดย ปกติแล้ว การดูดซับฟอสฟอรัสทั้งสองวิธีดังกล่าวจะมี การทำงานร่วมกัน แต่กรณีที่ดินมีปริมาณฟอสฟอรัสที่ เป็นประโยชน์จำกัด พืชจะอาศัยการดูดซับฟอสฟอรัส ผ่านทางเส้นใยรามากกว่าการดูดซับโดยตรงผ่านทาง รากพืช [21] ซึ่งจะเป็นผลทำให้พืชที่มีราอาร์บัสคูลาร์ ไมคอร์ไรซาเข้าอยู่อาศัยในรากมีการเจริญเติบโตดีกว่า พืชที่ไม่มีราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาเข้าอยู่อาศัยในราก [1] แต่กรณีที่ดินมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์สูง มักพบว่าพืชที่มีราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาเข้าอยู่อาศัย ในรากมีการเจริญเติบโตไม่ต่างกับพืชที่ไม่มีราอาร์บัสคู ลาร์ไมคอร์ไรซาเข้าอยู่อาศัยในราก [5-9] เนื่องจากพืช ได้รับฟอสฟอรัสอย่างเพียงพอแล้วผ่านทางรากพืช ดังนั้นปริมาณฟอสฟอรัสในพืชจึงเป็นปัจจัยควบคุมการ ดำรงชีวิตแบบพึ่งพาอาศัยของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซา กล่าวคือ เมื่อพืชสามารถดูดซับฟอสฟอรัสจาก การใส่ปุ๋ยได้อย่างเพียงพอผ่านทางรากพืช จะมีผลทำให้การพึ่งพาต่อราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาในการดูด ซับฟอสฟอรัสของพืชลดลง ดังนั้นการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส จึงเป็นปัจจัยควบคุมการดูดซับและการแลกเปลี่ยน ฟอสฟอรัสของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซา [1,22]

ตัวอย่าง เช่น งานวิจัยของ Ryan และคณะ [23] พบว่า ในกรณีที่ดินมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์สูง พืช จะไม่ตอบสนองต่อการเข้าอยู่อาศัยของราอาร์บัสคูลาร์ ไมคอร์ไรซาในราก หมายความว่า การเข้าอยู่อาศัยของ ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาในรากไม่ช่วยเพิ่มการดูดซับ ฟอสฟอรัสและการเจริญเติบโตของพืช ซึ่งผลการศึกษา ของ Smith และ Read [24] ได้ยืนยันผลของการใส่ปุ๋ย ฟอสฟอรัสอัตราสูงหรือในกรณีที่ดินมีปริมาณ ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์สูงที่มีต่อราอาร์บัสคูลาร์ไม คอร์ไรซา โดยพบว่าการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสอัตราสูงมีผล ทำให้การพัฒนาของโครงสร้างแลกเปลี่ยนธาตุอาหาร ของราที่อยู่ในเซลล์รากพืช (arbuscule) ลดลง จึงเป็น ผลทำให้การดูดซับและการแลกเปลี่ยนฟอสฟอรัส ของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาในรากพืชลดลงไปด้วย นอกจากนี้การใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสอัตราสูงยังมีผลทำให้ มวลชีวภาพของราทั้งในรากพืชและในดินลดลงด้วย อีก ทั้งงานวิจัยของ Bruce และคณะ [25] พบว่าการใส่ ปุ๋ยฟอสฟอรัสอัตราสูง ทำให้การเข้าอยู่อาศัยของรา อาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาในรากแตงกวา (*Cucumis sativus*) ลดลง เนื่องจากการพัฒนาขั้นตอนเพื่อเข้าอยู่ อาศัยของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาในรากพืชลดลง ซึ่งงานวิจัยของ Balzergue และคณะ [26] ได้ทำให้ เห็นผลของการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสอัตราสูงต่อการเข้าอยู่ อาศัยของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาในรากได้อย่าง ชัดเจน โดยพบว่าการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสอัตราสูงมีผล โดยตรงต่อการสร้าง appressorium ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาพัฒนาขึ้นเพื่อให้สามารถ เข้าไปในเซลล์รากพืชได้ เมื่อ appressorium ถูกสร้าง น้อยลง ก็ย่อมทำให้เปอร์เซ็นต์การเข้าอยู่อาศัยของรา ในรากพืชลดลงด้วย ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาในที่ พบว่าเปอร์เซ็นต์การเข้าอยู่อาศัยของราอาร์บัสคูลาร์ไม คอร์ไรซาในรากข้าวโพดน้อยที่สุดในดินที่มีปริมาณ ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์สูงและในดินที่มีการใส่ปุ๋ย

ฟอสฟอรัสเต็มอัตรา ดังนั้นจึงพอจะสรุปได้ว่าดินที่มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์สูงและการใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัสอัตราสูงมีผลทำให้การเข้าอยู่อาศัยของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาในรากลดลง ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพของราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาต่อพืชลดลงด้วย

## 5. สรุป

ราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซามีประสิทธิภาพสูงเมื่อใส่ในดินที่มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่ำและเมื่อใส่ร่วมกับการไม่ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสหรือใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสครึ่งอัตราของคำแนะนำ

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ทูสนันับสนุนการวิจัยจากกองทุนวิจัยมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ประเภททุนทั่วไป ประจำปีงบประมาณ 2559

## 7. References

- [1] Smith, S. E. and Read, D. J. , 1997, Mycorrhizal Symbiosis, 2nd Ed., Academic Press, London, 605 p.
- [2] Marschner, H. , 1995, Mineral Nutrition of Higher Plants, 2nd Ed. , Academic Press, London, 889 p.
- [3] Schachtman, D.P., Reid, R.J. and Ayling, S.M., 1998, Phosphorus uptake by plants: From soil to cell, Plant Physiol. 116: 447-453.
- [4] Li, H.Y., Smith, S.E., Ophel-Keller, K., Holloway, R.E. and Smith, F.A., 2008, Naturally occurring arbuscular mycorrhizal fungi can replace direct P uptake by wheat when roots cannot access added P fertilizer, Funct. Plant Biol. 35: 125-134.
- [5] Smith, F. A. , Grace, E.J. and Smith, S. E. , 2009, More than a carbon economy: nutrient trade and ecological sustainability in facultative arbuscular mycorrhizal symbioses, New Phytol. 182: 347-358.
- [6] Jakobsen, I. , 1999, Transport of Phosphorus and Carbon in Arbuscular Mycorrhizas, pp. 309-332, In Varma, A. and Hock, B. (Eds.), Mycorrhiza: Structure, Function, Molecular Biology and Biotechnology, 2nd Ed., Springer, Berlin.
- [7] Smith, F. A. , Jakobsen, I. and Smith, S. E. , 2000, Spatial differences in acquisition of soil phosphate between two arbuscular mycorrhizal fungi in symbiosis with *Medicago trunculata*. New Phytol. 114: 1-38.
- [8] Smith, S.E., Jakobsen, I., Grønlund, M. and Smith, F. A. , 2011, Roles of arbuscular mycorrhizas in plant phosphorus nutrition: Interactions between pathways of phosphorus uptake in arbuscular mycorrhizal roots have important implications for understanding and manipulating plant phosphorus acquisition, Plant Physiol. 156: 1050-1057.
- [9] Schnepf, A. , Roose, T. and Schweiger, P. , 2008, Impact of growth and uptake patterns of arbuscular mycorrhizal fungi on plant phosphorus uptake: A modeling study, Plant Soil 312: 85-99.

- [10] Smith, S.E., Smith, F.A. and Jakobsen, I., 2004, Functional diversity in arbuscular mycorrhizal (AM) symbioses: The contribution of the mycorrhizal P uptake pathway is not correlated with mycorrhizal responses in growth or total P uptake, *New Phytol.* 162: 511-524.
- [11] Daniels, B.A. and Skipper, H.D., 1982., Methods for the Recovery and Quantitative Estimation of Propagules from Soil, pp. 29-36. In Schenck, N.C. (Ed.), *Methods and Principles of Mycorrhizal Research*, APS., Minnesota.
- [12] Piper, C.S., 2010, *Soil and Plant Analysis*, Shree Publishers, New Delhi, 368 p.
- [13] Plenchette, C., Fortin, J.A. and Furlan, B., 1983, Growth responses of several plant species to mycorrhizae in a soil of moderate P-fertility: Part I. Mycorrhizal dependency under field conditions, *Plant Soil* 70: 199-209.
- [14] Phillips, J.M. and Hayman, D.S., 1970, Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection, *Trans. Br. Mycol. Soc.* 55: 158-161.
- [15] McGonigle, T.P., Miller, M.H., Evans, D.G., Fairchild, G.L. and Swan, J.A., 1990, A new method which gives an objective measure of colonization of roots by vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi, *New Phytol.* 115: 495-501.
- [16] Bethlenfalvai, G.J. and Barea, J.M., 1994, Mycorrhizae in sustainable agriculture: I. Effects on seed yield and soil aggregation, *Am. J. Altern. Agric.* 9: 157-161.
- [17] Hetrick, B.A.D., Wilson, G.W.T. and Todd, T.C., 1996, Mycorrhizal response in wheat cultivars, relationship to phosphorus, *Can. J. Bot.* 74: 19-25.
- [18] Thingstrup, I., Rubaek, G., Sibbesen, E. and Jakobsen, I., 1998, Flax (*Linum usitatissimum* L.) depends on arbuscular mycorrhizal fungi for growth and P uptake at intermediate but not high soil P levels in the field, *Plant Soil* 203: 37-46.
- [19] Sorensen, N., Larsen, J. and Jakobsen, I., 2005, Mycorrhiza formation and nutrient concentration in leeks (*Allium porrum*) in relation to previous crop and cover crop management on high P soils, *Plant Soil* 273: 101-114.
- [20] Smith, S.E. and Smith, F.A., 1990, Structure and function of the interfaces in biotrophic symbioses as they relate to nutrient transport, *New Phytol.* 114: 1-38.
- [21] Tinker, P.B. and Nye, P.H., 2000, *Solute Movement in the Rhizosphere*, Oxford University Press, New York. 464 p.
- [22] Graham, J.H., 2000, Assessing cost of arbuscular mycorrhizal symbiosis in agroecosystems, pp. 127-140, In Podila, G.K. and Douds, Jr., D.D. (Eds.), *Current Advances in Mycorrhizal Research*, APS Press, Minnesota.

- [23] Ryan, M.H., Norton, R.M., Kirkegaard, J.A., McCormick, K.M., Knights, S.E. and Angus, J. F. , 2002, Increasing mycorrhizal colonization does not improve growth and nutrition of wheat on Vertosols in south-eastern Australia, *Aust. J. of Agric. Res.* 53: 1173-1181.
- [24] Smith, S. E. and Read, D. J. , 2008, *Mycorrhizal Symbiosis*, 3rd Ed., Academic Press, London, 800 p.
- [25] Bruce, A., Smith, S.E. and Tester, M., 1994, The development of mycorrhizal infection in cucumber: Effects of P supply on root growth, formation of entry points and growth of infection unit, *New Phytol.* 127: 507-514.
- [26] Balzergue, C., Puech-Pagès, V., Bècard, G. and Rochange, S.F., 2001, The regulation of arbuscular mycorrhizal symbiosis by phosphate in pea involves early and systemic signaling events, *J. Exp. Bot.* 62: 1049-1060.