การปรับปรุงกิจกรรมของฟอสฟาเตสและมิเนอรัลไลเซชันของไนโตรเจนในดิน ซึ่งได้รับอิทธิพลจากไมคอร์ไรซาที่อยู่ร่วมกับข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ และปุ๋ยหมักกากตะกอนเยื่อกระดาษที่ระดับแตกต่างกัน

Phosphatase activity amendment and N-mineralization in soil as influenced from mycorrhiza associated maize and the different levels paper sludge compost

อาภาพร ขันตี [1] สิรินภา ช่วงโอภาส [1*] และ ธงชัย มาลา [1]

Apapron Khantee [1] Sirinapa Chungopast [1*] and Thongchai Mala [1]

บทคัดย่อ

การศึกษากิจกรรมของฟอสฟาเตสและมิเนอรัลไลเซชันของไนโตรเจนในดินที่ได้รับผลจาก *Glomus aggregatum* ซึ่งเจริญร่วมกับข้าวโพดและใส่ปุ๋ยหมักกากตะกอนเยื่อกระดาษในระดับต่างๆ วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์แบบแฟคทอเรียล 2×4 มี 2 ปัจจัย 1) การใส่และไม่ใส่ราวีเอไมคอร์ไรซา 2) ปริมาณปุ๋ยหมัก 4 ระดับคือ 0, 1,000, 2,000 และ 4,000 กก./ไร่ มีการวิเคราะห์ตัวอย่างดินและข้าวโพดในการทดลอง ผลการทดลองแสดงว่า การใส่ราวีเอไมคอร์ไรซาทำให้ปริมาณเอซิดฟอสฟาเตส ที่ 2, 4 และ 6 สัปดาห์ และปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน ที่ 2 สัปดาห์ สูงกว่าการไม่ใส่เชื้อ อย่างไรก็ตาม ไม่ทำให้เกิดความแตกต่างทางสถิติของการเข้าอาศัยในรากของราและมิเนอรัลไลเซชันของไนโตรเจน การใส่ปุ๋ยหมัก 4,000 กก./ไร่ ทำให้ปริมาณเอซิดฟอสฟาเตสและฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ที่ 2 สัปดาห์ สูงสุด คือ 15.92 พีพีเอ็ม และ 19.58 มก./กก. ตามลำดับ ปุ๋ยหมักอัตรา 1,000 กก./ไร่ ทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ที่ 4 สัปดาห์ สูงสุด คือ 28.83 มก./กก. ปุ๋ยหมักอัตรา 4,000 กก./ไร่ มีอิทธิพลให้ปริมาณมิเนอรัลไลเซชันของไนโตรเจน ที่ 4 สัปดาห์ สูงสุดเท่ากับ 6.25 $\mu g\ g^{-1}$ dwt day^{-1} และอัตรา 4,000 กก./ไร่ ทำให้น้ำหนักแห้งของใบและราก ปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทั้งหมดสูงกว่าการใส่ปุ๋ยหมักในอัตราอื่น ในใบข้าวโพดมีปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทั้งหมดสูง ดังนั้นการใส่ปุ๋ยหมักกากตะกอนเยื่อกระดาษเป็นการเพิ่มอินทรียวัตถุในดิน กระตุ้นกิจกรรมของวีเอไมคอร์ไรซา รวมถึงการเพิ่มมิเนอรัลไลเซชันของไนโตรเจนในดิน

คำสำคัญ : ฟอสฟาเตส วีเอไมคอร์ไรซา

[1] ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม 73140

[1] Department of Soil Science, Faculty of Agriculture at Kamphaeng Saen, Kasetsart University, Nakhon Pathom 73140

[*] Corresponding author: agrsrnp@ku.ac.th

Abstract

The activity of the phosphatase and N mineralization in soils affected from *Glomus aggregatum* cooperation with maize at different levels of the compost. Experimental treatment were arranged 2×4 factorial experiment in completely randomized design containing 2 factors 1) inoculation and uninoculation of VA-mycorrhiza fungi and 2) application of compost 4 levels as 0, 1,000, 2,000 and 4,000 kg/rai. Soil and maize samples were analyzed. The experiment results showed the marked influence of VA-mycorrhiza fungi inoculation on soil P status as follows: Acid phosphatase at 2, 4 and 6 weeks and available phosphorus in soil at 2 weeks are higher than that of uninoculation. However, it was not statistically difference of root colonization of the fungi and N-mineralization. After 2 weeks, compost application rate 4,000 kg/rai caused the highest amount of acid phosphatase and the available phosphorus which were 15.92 ppm and 19.58 mg/kg, respectively. Four weeks after application of compost rate 1,000 kg/rai contributed to the maximum available phosphorus which was 28.83 mg/kg. The rate of compost 4,000 kg/rai at 4 weeks influenced the greatest N-mineralization was 6.25 µg g^{-1} dwt day^{-1}. The some compost rate also increased on dry weight of maize leaves and root, the amount of nitrogen, and phosphorus, over other rates and the corn leaves also contained the higher total nitrogen and phosphorus. Consequently, the application of paper sludge compost increases the organic matter in soil, motivates the VA-mycorrhiza activities together with N-mineralization in soil.

บทนำ

ไมคอร์ไรซาเป็นราชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญในการทำการเกษตร โดยเฉพาะในระบบเกษตรอินทรีย์ที่สามารถใช้จุลินทรีย์ในการผลิตพืชได้ มีประโยชน์ในแง่ของการช่วยละลายฟอสเฟตในดิน ทำให้อยู่ในรูปที่พืชใช้ประโยชน์ได้ทันที ซึ่งมีกลไกการทำงานผ่านเอนไซม์ฟอสฟาเตสที่ราผลิตขึ้น (Dighton, 1983) แต่จุลินทรีย์ยังมีความต้องการแหล่งคาร์บอนเพื่อใช้เป็นพลังงานในการขับเคลื่อนกิจกรรมภายในเซลล์ รวมถึงการผลิตเอนไซม์ฟอสฟาเตส ปุ๋ยอินทรีย์อาจช่วยเพิ่มทั้งธาตุอาหารหลัก ธาตุอาหารรองให้แก่พืช และยังช่วยส่งเสริมกิจกรรมฟอสฟาเตสได้ (Amaya-Carpio *et al*., 2009) นอกจากแหล่งคาร์บอนที่ราได้จากการสังเคราะห์แสงของพืชแล้ว กากตะกอนเยื่อกระดาษก็สามารถเป็นแหล่งคาร์บอนได้ เพราะมีปริมาณอินทรียวัตถุสูง ในส่วนของอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษในประเทศไทยนั้น ปริมาณกากตะกอนที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตนั้นขึ้นอยู่กับกำลังการผลิต เช่น โรงงานผลิตเยื่อกระดาษ

Keyword : Phosphatase, VA-mycorrhiza

5 โรง กำลังการผลิต 5,000-29,730 ตัน ปริมาณกากตะกอน 29,850 ตัน (พรฤดี, 2552) ซึ่งสามารถใช้ประโยชน์จากเยื่อกระดาษเหลือใช้ในโรงงานผลิตกระดาษเหล่านี้ได้ งานวิจัยนี้จึงศึกษาผลของการใส่ราวีเอไมคอร์ไรซาและการใช้ปุ๋ยหมักจากกากตะกอนเยื่อกระดาษในระดับต่างๆ ร่วมกับการปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ เนื่องจากข้าวโพดอยู่ร่วมกับราวีเอไมคอร์ไรซาได้ดี (Negrete-Yankelevich *et al*., 2013) และเป็นพืชที่ตอบสนองต่อการใช้ปุ๋ยอินทรีย์ (Soro *et al*., 2015) ซึ่งคาดว่าจะส่งผลต่อกิจกรรมของเอนไซม์ฟอสฟาเตสในดิน เป็นการเพิ่มและเร่งการปลดปล่อยฟอสฟอรัสให้อยู่ในระดับไม่ขาดแคลน และส่งผลต่อปริมาณมิเนอรัลไลเซชันของไนโตรเจนในดิน รวมทั้งปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบในข้าวโพด

การตรวจเอกสาร

เอนไซม์ฟอสฟาเตส (Phosphatases) เป็นกลุ่มของเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการละลาย (hydrolysis) ของ ester และ anhydride ของ H_3PO_4 ฟอสฟาเตส แบ่งออกได้เป็น 5 กลุ่มหลัก ดังต่อไปนี้ (ธงชัย และคณะ, 2551; Alef and Nannipieri, 1995) 1) Phosphoric monoester 2) Phosphoric diester hydrolases 3) Triphosphoric monoester hydrolases 4) เอนไซม์ที่ทำหน้าที่สลาย phosphoryl-containig anhydrides 5) เอนไซม์ที่ทำหน้าที่สลาย P-N bond เช่น phosphoamidase ฟอสฟอรัสในดินมีทั้งฟอสฟอรัสอินทรีย์และอนินทรีย์ แต่เอนไซม์ฟอสฟาเตสของราไมคอร์ไรซา (mycorrhizal fungi) สามารถใช้ละลายฟอสเฟตอินทรีย์ได้ (Tiamtanong *et al*., 2015) ซึ่งประกอบด้วยเอซิดฟอสฟาเตส (acid phosphatase) และอัลคาไลน์ฟอสฟาเตส (alkaline phosphatase) นั้นได้มีการศึกษากันอย่างกว้างขวาง และเอนไซม์ดังกล่าวมีกิจกรรมอย่างเหมาะสมในช่วงสภาพกรดและด่าง ตามชื่อของเอนไซม์ การศึกษาส่วนใหญ่มุ่งไปที่เอซิดฟอสฟาเตส ซึ่งปฏิกิริยาโดยทั่วไปแสดงดังต่อไปนี้

$$R\text{-}PO_4^{2-} + H_2O \text{ ---> } R\text{-}OH + HPO_4^{2-}$$

ฟอสฟอรัสในสารละลายดินมีประจุลบสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ทันทีกับโลหะที่มีประจุบวก เช่น เหล็ก อะลูมินั่ม และแมงกานีสในดินกรด และเกิดปฏิกิริยากับสารประกอบแคลเซียมในดินที่เป็นกลางและด่าง มีการตรึงฟอสเฟตที่พื้นผิวของสารประกอบอย่างแข็งแรง นอกจากนี้ การตกตะกอนของฟอสเฟตทำให้ได้สารประกอบที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ (Sharma *et al*., 2013) รายงานของ Kapri and Tewari (2010) พบกิจกรรมฟอสฟาเตสที่สูงของไมคอร์ไรซา ไอโซเลต DRT-1 เท่ากับ 14.50 $U.ml^{-1}$ และมีกิจกรรมจำเพาะ 658.62 $U.mg^{-1}$ ที่ 72 ชม. ตอบสนองต่อความเป็นไปได้ในการละลายฟอสเฟตที่ถูกตรึงในดินได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับไอโซเลตอื่น สำหรับ *Glomus aggregatum* จัดอยู่ในวงศ์ Glomeraceae สกุล Glomus อยู่ในกลุ่มของวีเอไมคอร์ไรซาที่รู้จักกันอย่างกว้างขวาง Tanaka and Yano (2005) ศึกษา *G. aggregatum* พบว่าราแสดงความสามารถในการปรับปรุงการดูดซึมสารอาหารในพืชผ่านเส้นใยนอกราก โดยเฉพาะธาตุฟอสฟอรัส และยังสามารถขนส่งไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียมไปให้พืชได้ ปัจจุบันมีการใช้ประโยชน์ของราวีเอไมคอร์ไรซา เพื่อส่งเสริมการ

เจริญเติบโตของพืชมากขึ้นเป็นลำดับ โดยเฉพาะข้าวโพด (ธงชัย, 2550) รายงานเกี่ยวกับไมคอร์ไรซา 3 ชนิด ได้แก่ *G. aggregatum, R. intraradices* และ *F. mosseae* พบการเข้าอาศัยในรากข้าวโพดสูง และส่งเสริมการเจริญของข้าวโพดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับตำรับที่ไม่ใส่เชื้อ ทำให้เปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้งของข้าวโพดเพิ่มขึ้น 83, 55 และ 106 ตามลำดับ (Guo *et al*., 2014) การใช้ *G. aggregatum* ร่วมกับการปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ลูกผสมเดี่ยวพันธุ์สุวรรณ 4452 สามารถเพิ่มการเจริญของข้าวโพดได้มากเท่ากับการใช้ปุ๋ยเคมี และพบว่ามีฟอสฟอรัสสูงในต้นข้าวโพดของตำรับที่มีการใส่ไมคอร์ไรซา (Mala *et al*., 2010)

วัสดุเหลือใช้กากตะกอนเยื่อกระดาษมีปริมาณมากถึง 1 ตันต่อวัน จากโรงงานผลิตกระดาษลูกฟูก 1 โรง ต้องนำไปฝังกลบและเผาทำลาย (วชิระ, 2555) การนำกากตะกอนเยื่อกระดาษมาทำปุ๋ยหมัก นอกจากจะสามารถนำมาใช้ประโยชน์ทางการเกษตรแล้ว ยังเป็นการลดมลภาวะทางดินอีกทางหนึ่ง Dayegamiye *et al.,* 2010 รายงานการใส่กากตะกอนเยื่อกระดาษหมักเพียงอย่างเดียว และการใช้กากตะกอนเยื่อกระดาษหมักร่วมกับการลดอัตราการใช้ปุ๋ยไนโตรเจน 25% โดยใส่ปุ๋ย 3 ครั้ง พบว่าสมบัติดินและผลผลิตข้าวโพดอาหารสัตว์และการดูดซึมไนโตรเจนในพืชดีกว่าเมื่อเทียบกับตำรับควบคุมที่ไม่ได้ใส่ปุ๋ยเลย และมีค่าใกล้เคียงหรือเทียบเท่ากับปุ๋ยเคมีในปีที่ 3 ผลของการใส่ปุ๋ยอินทรีย์อัตราต่างๆ ต่อกิจกรรมของเอนไซม์ในดินหลายชนิด รวมทั้งเอนไซม์เอซิดและอัลคาไลน์ฟอสฟาเตส พบว่า กิจกรรมของเอนไซม์ในดินทั้งหมดที่ตรวจสอบมีความสัมพันธ์สอดคล้องกันเป็นเส้นตรงอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติกับองค์ประกอบของอินทรียวัตถุในดิน กล่าวคือ ถ้าปริมาณอินทรียวัตถุเพิ่มขึ้น กิจกรรมของเอนไซม์ก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย (Chang *et al*., 2007) การเติมปุ๋ยอินทรีย์ลงดินเป็นการสนับสนุนกิจกรรมของวีเอไมคอร์ไรซาและความหลากหลายทางชีวภาพบริเวณเขตอิทธิพลรากพืช (rhizosphere) ของข้าวโพดและถั่ว เมื่อเปรียบเทียบกับตำรับควบคุมที่ไม่ได้ใส่ราไมคอร์ไรซา (Sousa *et al*., 2012) งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษากิจกรรมเอนไซม์ฟอสฟาเตสและมิเนอรัลไลเซชันของไนโตรเจนในดินที่ได้รับผลจากการใส่ราวีเอไมคอร์ไรซาและปุ๋ยอินทรีย์ในระดับต่างๆ ต่อการเจริญเติบโต และธาตุองค์ประกอบของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของราวีเอไมคอร์ไรซา และการใช้ปุ๋ยหมักกากตะกอนเยื่อกระดาษ ในการส่งเสริมการเกิดกิจกรรมฟอสฟาเตสและมิเนอรัลไรเซชันของไนโตรเจนในดิน

2. เพื่อศึกษาปริมาณการปลดปล่อยฟอสฟอรัสจากรูปสารอินทรีย์โดยการส่งเสริมของราวีเอไมคอร์ไรซา

3. เพื่อตรวจสอบความสามารถในการดูดกินฟอสฟอรัสและไนโตรเจนของข้าวโพดที่ได้รับเชื้อราวีเอไมคอร์ไรซา และปุ๋ยหมักกากตะกอนเยื่อกระดาษ

วิธีการ

วางแผนการทดลอง แบบ 2×4 factorial in CRD จำนวน 4 ซ้ำ มี 2 ปัจจัย ปัจจัยที่ 1 การ

ใส่ราวีเอไมคอร์ไรซา (*Glomus aggregatum*) ชนิดเม็ด มีปริมาณ 15 สปอร์/กรัม มี 2 ระดับ คือ การใส่เชื้อ (10 เม็ด/กระถาง) และการไม่ใส่เชื้อ (ใส่เม็ดเชื้อที่อบฆ่าเชื้อแล้ว 10 เม็ด/กระถาง) ปัจจัยที่ 2 คือ ปริมาณปุ๋ยหมักกากตะกอนเยื่อกระดาษ 4 ระดับ คือ 0 1,000 2,000 และ 4,000 กก./ไร่

การวิเคราะห์สมบัติบางประการของชุดดินปากช่อง และปุ๋ยหมักกากตะกอนเยื่อกระดาษ การวิจัยใช้ชุดดินปากช่อง (Pak chong soil series) วิเคราะห์ความเป็นกรดหรือด่างของดินและปุ๋ยอินทรีย์ โดยใช้อัตราส่วนดินต่อน้ำเท่ากับ 1:1 วัดค่า pH ด้วย pH meter วัดค่าการนำไฟฟ้า โดยใช้อัตราส่วนตัวอย่างดินต่อน้ำเท่ากับ 1:5 คนให้เข้ากัน ทิ้งไว้อย่างน้อย 12 ชม. ด้วยเครื่อง electrical conductivity meter (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2548) วิเคราะห์ปริมาณอินทรียวัตถุโดยการไทเตรตใช้วิธีของ Walkley and Black วิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด นำสารละลายตัวอย่างไปวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนด้วยวิธีการกลั่น วิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ สกัดดินด้วยน้ำยา Bray II วัดความเข้มสีของสารละลายด้วยเครื่อง Spectromic 21 ที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร วิเคราะห์ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ โดยนำตัวอย่างดินไปสกัดด้วย 1 N แอมโมเนียมอะซิเตรต pH 7.0 แล้วนำสารละลายตัวอย่างไปวัดความเข้มข้นของธาตุชนิดต่างๆ ด้วยเครื่อง atomic absorption spectrophotometer (ทัศนีย์ และจงรักษ์, 2542)

การปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

นำกระถางพลาสติก 21 นิ้ว เตรียมดินให้มีความสม่ำเสมอ ใส่ลงกระถางละ 10 กิโลกรัม เติมปุ๋ย 15-15-15 ตามค่าวิเคราะห์ดิน และใส่ปุ๋ยหมักตามตำรับการทดลอง (ปัจจัยที่ 2) คลุกเคล้าให้ดี เติมน้ำลงไป 300 มล. ทุกกระถาง ปล่อยไว้ข้ามคืน แล้วจึงหยอดเมล็ดข้าวโพดพันธุ์สุวรรณ 4452 กระถางละ 2 เมล็ด หลังจากนั้นถอดแยกเหลือเพียง 1 ต้น ที่อายุ 7 วัน เก็บตัวอย่างดินและราก เมื่อข้าวโพดมีอายุ 2, 4 และ 6 สัปดาห์ โดยการใช้หลอดเจาะดินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร แต่ละครั้งเก็บ 2 จุดในทิศทางตรงกันข้ามกันโดยแต่ละจุดห่างจากโคนต้น 1 นิ้ว รวมตัวอย่างดินเพื่อศึกษาข้อมูลต่อไป

การตรวจหาเปอร์เซ็นต์การเข้าอยู่อาศัยในรากข้าวโพดของราวีเอไมคอร์ไรซา

ทำรากข้าวโพดให้ใสและย้อมสี ตามวิธีของ Phillips and Hayman (1970) นำรากข้าวโพดมาล้างดินออกให้สะอาดด้วยน้ำ แล้วตัดรากให้ยาวประมาณ 1 ซม. แช่รากในสารละลาย 10% KOH ใน water bath ที่อุณหภูมิ 70°C นาน 1 ชม. ล้างรากด้วยน้ำ แช่รากใน alkaline H_2O_2 solution นาน 1 ชม. ล้าง H_2O_2 ออกไปด้วยน้ำ แช่รากใน HCl solution ($HCl:H_2O$ = 1:4) นาน 10-15 นาที เพื่อต้องการให้รากนั้นมีสภาพเป็นกรด นำรากออกจากสารละลาย HCl โดยไม่ต้องล้างน้ำ แช่รากในสารละลาย trypan blue ไม่น้อยกว่า 8 ชม. เก็บรากในสารละลาย lactic acid เพื่อศึกษาต่อไป

นำรากไปตรวจหาการเข้าสู่รากพืชของราวีเอไมคอร์ไรซาด้วยวิธี gridline intersect method (Giovannetti and Mosse, 1979) โดยใช้คีมแบ่งรากมาส่วนหนึ่ง วางรากในจานแก้ว กระจายรากให้ทั่วโดยใช้น้ำกลั่นฉีด ใช้หลอดดูด

ดูดน้ำในจานแก้วให้แห้ง แล้วนำไปส่องดูภายใต้กล้อง dissecting microscope ให้สังเกตเฉพาะจุดตัดของรากกับเส้นตรงของ gridline บันทึกข้อมูลของจำนวนจุดตัดทั้งหมด และจุดตัดที่มีราวีเอไมคอร์ไรซาเข้าอาศัยอยู่

การวิเคราะห์เอนไซม์เอซิดฟอสฟาเตสในดินที่ปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

ใส่ดิน 1.0 กรัม ลงในฟลาสก์ขนาด 50 มล. เติม toluene จำนวน 0.2 มล. และ MUB. pH 6.5 จำนวน 4 มล. เติม p-nitrophenyl phosphate solution จำนวน 1 มล. แกว่งให้เข้ากัน 2-3 วินาที ปิดฝาฟลาสก์ด้วยจุกยาง แล้ววางไว้ใน incubator อุณหภูมิ 37°C หลังจากบ่มไว้ 1 ชม. เปิดจุกยางแล้วเติม 0.5M $CaCl_2$ จำนวน 1 มล. และ 0.5M NaOH จำนวน 4 มล. แกว่งฟลาสก์ให้เข้ากัน 2-3 วินาที กรองสารละลายผ่านกระดาษกรอง Whatman no.2 วัดความเข้มของสีเหลืองที่เกิดขึ้นโดยเครื่อง spectrophotometer แล้วคำนวณหาปริมาณ p-nitrophenol ของสารละลายที่กรองได้ หลังจากเทียบกับ calibration graph ของ standard 0-50 µg ของ p-nitrophenol

การวิเคราะห์ปริมาณมิเนอรัลไลเซชันของไนโตรเจนในดิน

ใส่ดินลงในฟลาสก์ 10 กรัม ให้ความชื้นด้วยน้ำกลั่น 3 มล. บ่มที่อุณหภูมิ 25°C นาน 7-30 วัน หลังจากบ่ม แขวนลอยดินในฟลาสก์ด้วยการเติม 1% potassium sulfate solution 100 มล. เขย่า 1 ชม. และกรองผ่านกระดาษกรองเก็บส่วนใสสำหรับวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนียมและไนเตรต

(1) วิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนียม เติมส่วนใส จำนวน 50 มล. ลงใน volumetric flask ขนาด 100 มล. เติมสารละลาย phenol/NaOH จำนวน 4 มล. และ sodium hypochorite 3 มล. แล้วผสมให้เข้ากัน หลังจากนั้น 90 นาที วัดความขุ่นของสารละลาย ที่ความยาวคลื่น 630 นาโนเมตร นำไปวัดค่า optical density ด้วยเครื่อง spectrophotometer คำนวณความเข้มข้นของ NH^+_4-N ดังสมการ

$$NH^+_4\text{-N } (\mu g\ g^{-1}\ dwt) = (NH^+_4\text{-N } (\mu g\ 50\ ml^{-1})\ filteate \times 2) / Dwt \times 10$$

เมื่อ dwt คือ น้ำหนักดินแห้ง 1 กรัม, 2 คือ multiplication factor ที่ได้จากการพิจารณาสารละลายดินทั้งหมด และ 10 คือ น้ำหนักดินที่ใช้ในการทดลอง

(2) วิเคราะห์ปริมาณไนเตรต เติมส่วนใส จำนวน 2.5, 5 หรือ 10 มล. ลงใน volumetric flask ขนาด 100 มล. และปรับปริมาตรให้ได้ 100 มล. ด้วย potassium sulfate และเติม sulfuric acid solution จำนวน 2 มล. แกว่งให้เข้ากัน เติมสารละลายที่ได้จำนวน 10 มล. ลงในหลอดแก้วที่บรรจุ zinc granules 1-2 เม็ด ผสมให้เข้ากัน บ่มไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 4-5 ชม. วัดค่า optical density ของของเหลวด้วยเครื่อง spectrophotometer ที่ช่วงความยาวคลื่น 210 นาโนเมตร คำนวณความเข้มข้น NO^-_3-N ดังสมการ

$$NO^-_3\text{-N } (\mu g\ g^{-1}\ dwt) = (NO^-_3\text{-N } (\mu g\ 50\ ml^{-1})\ filteate \times 2)/\ Dwt \times 10$$

และคำนวณอัตรา N-mineralization ดังสมการ

$$Nmin\ (\mu g\ g^{-1}\ dwt\ day^{-1}) = (NH^+_4\text{-Na}+NO^-_3\text{-Na}) - \frac{(NH^+_4\text{-Nb}+NO^-_3\text{-Nb})}{t \times dwt}$$

เมื่อ NH^+_4-Na คือความเข้มข้นของ NH^+_4-N หลังการบ่ม, NO^-_3-Na คือความเข้มข้นของ NO^-_3-N หลังบ่ม, NH^+_4-Nb คือความเข้มข้นของ NH^+_4-N ของควบคุม, NO^-_3-Nb คือความเข้มข้นของ NO^-_3-N ของควบคุม, t คือเวลาในการบ่ม และ dwt คือน้ำหนักดินแห้ง 1 กรัม

การวิเคราะห์น้ำหนักแห้งและธาตุองค์ประกอบในข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

วิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (total nitrogen) ของตัวอย่างวัสดุ ย่อยตัวอย่างพืชด้วยสารผสมสำหรับการย่อย ซึ่งประกอบด้วย H_2SO_4:Na_2SO_4:Se ในอัตราส่วน 100:10:1 นำสารละลายตัวอย่างไปวิเคราะห์ด้วยวิธีการกลั่น วิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (total phosphorus) ของตัวอย่างวัสดุ ย่อยตัวอย่างพืชเช่นเดียวกับการวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด แต่นำสารละลายตัวอย่างไปทำปฏิกิริยากับสารละลาย ammonium molybdate และ ammonium metavanadate ได้สารประกอบเชิงซ้อนสีเหลืองใส วัดความเข้มสีของสารละลายด้วยเครื่อง Spectronic 21 ที่มีความยาวคลื่น 440 นาโนเมตร (ทัศนีย์ และจงรักษ์, 2542)

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (analysis of variance) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันโดยวิธี Duncan' New Multiple Rang Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 และ 99% โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป statistical analysis system (SAS) version 12

ผลการศึกษาและวิจารณ์

วิเคราะห์สมบัติบางประการของชุดดินปากช่องและปุ๋ยหมักกากตะกอนเยื่อกระดาษ สมบัติบางประการของชุดดินปากช่องที่นำมาศึกษาชุดดินปากช่องมีเนื้อดินเป็นดินเหนียว (Clay) ค่า pH เป็นกรดเท่ากับ 4.05 สภาพการนำไฟฟ้า 0.36 dS m^{-1} ปริมาณอินทรียวัตถุ 2.37% ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด 0.06% ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ 6.67 mg kg^{-1} ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ 40.15 mg kg^{-1} และกากตะกอนเยื่อกระดาษ มีค่า pH 7.5 สภาพการนำไฟฟ้า 3.42 dS m^{-1} อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 20.17 มีปริมาณอินทรียวัตถุสูง 47.45% ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด 0.06% ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ 0.35 mg kg^{-1} ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ 0.46 mg kg^{-1}

การศึกษาเปอร์เซ็นต์การเข้าอยู่อาศัยในรากข้าวโพดของราวีเอไมคอร์ไรซา

จากการศึกษาผลการใส่หรือไม่ใส่ *Glomus aggregatum* ทำให้ข้าวโพดมีปริมาณการเข้าอยู่อาศัยในรากของรา ไม่แตกต่างทางสถิติทุกอายุการเก็บเกี่ยว (Table 1) แต่หลังจากการ

ใส่ราวีเอไมคอร์ไรซา 2 และ 6 สัปดาห์ ปริมาณการเข้าอยู่อาศัยในรากของราในดินมีแนวโน้มมีค่าสูงกว่าการไม่ใส่ราวีเอไมคอร์ไรซา สอดคล้องกับการศึกษาของ Salyards *et al*. (2003) ที่พบว่าการใส่เชื้อวีเอไมคอร์ไรซาจะทำให้เกิดการเข้าอยู่อาศัยของราในรากของ *Bromus carinatus* และรากของ *Deschampsia caespitose* รวดเร็วกว่าการไม่ใส่เชื้อวีเอไมคอร์ไรซา

ผลของระดับปุ๋ยอินทรีย์ต่อปริมาณการเข้าอยู่อาศัยในรากของรา พบว่าที่อายุ 2 สัปดาห์ แม้ว่าปริมาณปุ๋ยอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นแต่ละระดับนั้นจะไม่มีผลทำให้ข้าวโพดมีปริมาณการเข้าอยู่อาศัยในรากของราในดินแตกต่างกันทางสถิติ แต่แสดงปริมาณการเข้าอยู่อาศัยในรากของราในดินสูงสุดคือ 33.44% ส่วนที่อายุ 6 และ 8 สัปดาห์ มีปริมาณการเข้าอยู่อาศัยในรากของราในดินสูงสุดคือ 65.05 และ 77.87% ตามลำดับ และไม่พบปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างการใส่เชื้อกับปุ๋ยหมักระดับต่างๆ ต่อปริมาณการเข้าอยู่อาศัยในรากของราในดินปลูกข้าวโพด

จากการศึกษาของ Medina *et al*. (2003) ในพืชยาสูบที่มีการทรานส์ฟอร์มยีนที่เกี่ยวข้องกับกรดซาลิซิลิก (salicylic acid) พบว่าระดับกรดซาลิซิลิกมีผลต่อการเข้าอาศัยของราในรากพืช โดยถ้ามีการเพิ่มระดับของกรดซาลิซิลิกจะทำให้เกิดการเข้าอยู่อาศัยในรากพืชช้าลง ดังนั้นปุ๋ยอินทรีย์จึงไม่ใช่ปัจจัยที่มีผลต่อการเข้าอาศัยของราในรากพืช

Table 1 The effects of *Glomus aggregatum* and levels of organic fertilizer on mycorrhiza colonization in *Zea may* L. cultured soil

Treatment	Mycorrhiza colonization (%)		
	2 week	4 week	6 week
Factor 1 (*Glomus aggregatum*)			
with	33.48	57.53	68.43
without	30.45	57.06	65.10
F-test	ns	ns	ns
Factor 2 (Organic fertilizer, kg/rai)			
0	33.44	52.41	55.95
1000	30.75	65.05	71.73
2000	33.39	49.84	77.87
4000	30.28	61.89	61.51
F-test	ns	ns	ns
Mycorrhiza × Organic fertilizer	ns	ns	ns
CV (%)	37.98	21.26	34.66

Statistically significant differences indicated with *p>0.05, **p>0.01 by Duncan's new multiple range test, ns : non-significant

การศึกษาเอนไซม์เอซิดฟอสฟาเตสในดินที่ปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

จากผลการศึกษาผลจากการใส่หรือไม่ใส่ *G. aggregatum* ทำให้ข้าวโพดมีกิจกรรมของเอซิดฟอสฟาเตสแตกต่างกันทุกอายุการเก็บเกี่ยว กล่าวคือ ที่อายุ 2, 4 และ 6 สัปดาห์ ข้าวโพดที่ใส่ราวีเอไมคอร์ไรซา จะมีปริมาณของเอซิดฟอสฟาเตสสูงกว่าการไม่ใส่เชื้ออย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ (Table 2) สอดคล้องกับรายงานของ Qiao *et al*. (2015) ในถั่วปากอ้าที่ใส่เชื้อไมคอร์ไรซาจะมีกิจกรรมของเอซิดฟอสฟาเตสสูงกว่าในตำรับที่ไม่ใส่เชื้อ

ส่วนผลของระดับปุ๋ยหมักต่อกิจกรรมของเอนไซม์เอซิดฟอสฟาเตสของข้าวโพด พบว่าที่อายุ 2 สัปดาห์ เมื่อระดับปุ๋ยหมักสูงสุดจะมีปริมาณของเอนไซม์เอซิดฟอสฟาเตสสูงสุดเท่ากับ 15.92 ppm และแตกต่างจากปริมาณกิจกรรมของเอนไซม์เอซิดฟอสฟาเตสของข้าวโพดที่ใส่ปุ๋ยหมักในอัตราอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่มีปริมาณใกล้เคียงกับการใส่ปุ๋ยหมักในอัตรา 1,000 และ 2,000 กก./ไร่ คือ 12.42 และ 13.80 ppm ส่วนที่อายุ 4 และ 6 สัปดาห์ อัตราปุ๋ยหมักไม่มีผลทำให้ปริมาณกิจกรรมของเอนไซม์เอซิดฟอสฟาเตสแตกต่างกันทางสถิติ แต่การใส่ปุ๋ยหมักในอัตรา 2,000 กก./ไร่สูงสุด คือ 18.63 ppm สำหรับข้าวโพดที่อายุ 4 สัปดาห์ และที่ 6 สัปดาห์ การใส่ปุ๋ยหมักในอัตรา 4,000 กก./ไร่ มีค่าสูงสุด คือ 25.15 ppm พบว่าไม่มีปฏิกิริยาสัมพันธ์กัน

Table 2 The effects of *Glomus aggregatum* and levels of organic fertilizer on acid phosphatase in *Zea may* L. cultured soil

Treatment	Acid Phosphatase (ppm)		
	2 week	4 week	6 week
Factor 1 (*Glomus aggregatum*)			
with	14.86	20.65	27.46
without	10.95	15.40	21.34
F-test	**	**	**
Factor 2 (Organic fertilizer, kg/rai)			
0	9.49 ^{c}	17.23	23.55
1000	12.42 ^{ab}	18.23	24.45
2000	13.80 ^{a}	18.63	24.45
4000	15.92 ^{a}	18.00	25.15
F-test	*	ns	ns
Mycorrhiza × Organic fertilizer	ns	ns	ns
CV (%)	37.25	24.08	20.20

Statistically significant differences indicated with *p>0.05, **p>0.01 by Duncan's new multiple range test, ns : non-significant

ระหว่างการใส่ *G. aggregatum* กับปริมาณปุ๋ยหมักระดับต่างๆ ที่มีต่อปริมาณกิจกรรมของปริมาณเอนไซม์เอซิดฟอสฟาเตสอย่างมีนัยสำคัญทุกอายุการเก็บเกี่ยวของข้าวโพด การที่ระดับปุ๋ยอินทรีย์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้กิจกรรมของเอซิดฟอสฟาเตสสูงขึ้นในสัปดาห์ที่ 2 หลังการใส่ปุ๋ยหมัก สอดคล้องกับการทดลองของ Amaya-Carpio *et al*. (2009) ที่รายงานว่าไมคอร์ไรซาได้รับสารอาหารเพิ่มขึ้นจากแหล่งของปุ๋ยอินทรีย์ จึงทำให้กิจกรรมของเอนไซม์ฟอสฟาเตสเพิ่มขึ้น

การศึกษาปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน

ผลของการใส่ *G. aggregatum* ต่อปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน พบว่าที่อายุ 2 สัปดาห์ การใส่เชื้อและไม่ใส่เชื้อ ส่งผลให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ โดยพบว่าข้าวโพดที่ได้รับการใส่เชื้อมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์สูงกว่าการไม่ใส่เชื้อ ผลการทดลองสอดคล้องกับ Roy-Bolduc and Hijri (2010) ที่อธิบายไว้ว่าวีเอไมคอร์ไรซามีเส้นใยที่มีพื้นที่ผิวมากและมีประสิทธิภาพในการดูดซึมฟอสฟอรัส นอกจากนี้ การใส่เชื้อไมคอร์ไรซาทำให้เกิดกิจกรรมของเอนไซม์ฟอสฟาเตสในดิน ช่วยในการเปลี่ยนสารฟอสเฟตอินทรีย์ให้อยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชด้วย ส่วนอายุที่ 4 และ 6 สัปดาห์ พบว่าการใส่และไม่ใส่เชื้อ ไม่ทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์แตกต่างกันทางสถิติ (Table 3)

Table 3 The effects of *Glomus aggregatum* and levels of organic fertilizer on available phosphate in *Zea may* L. cultured soil

Treatment	Available phosphate (mg/kg)		
	2 week	4 week	6 week
Factor 1 (*Glomus aggregatum*)			
with	19.57	22.72	31.57
without	13.28	23.66	28.41
F-test	**	ns	ns
Factor 2 (Organic fertilizer, kg/rai)			
0	12.84 [b]	19.08 [b]	28.56
1000	15.31 [ab]	28.83 [a]	29.22
2000	17.98 [ab]	22.58 [ab]	27.84
4000	19.58 [a]	22.27 [ab]	34.35
F-test	*	*	ns
Mycorrhiza × Organic fertilizer	ns	ns	ns
CV (%)	37.83	33.74	22.27

Statistically significant differences indicated with *p>0.05, **p>0.01 by Duncan's new multiple range test, ns : non-significant

เมื่อพิจารณาถึงปริมาณปุ๋ยหมักที่ระดับต่างๆ ที่มีต่อปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน พบว่าที่อายุข้าวโพด 2 สัปดาห์ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อปริมาณปุ๋ยหมักสูงขึ้น ส่งผลให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย กล่าวคือ ระดับปุ๋ยหมัก 4,000 กก./ไร่ มีค่าสูงสุด และมีค่าใกล้เคียงกับระดับปุ๋ยหมัก 2,000 และ 1,000 กก./ไร่ คือ 19.58, 17.98 และ 15.31 มก./กก. ตามลำดับ ส่วนที่อายุ 4 สัปดาห์ ปริมาณปุ๋ยหมักที่ระดับต่างๆ ที่มีต่อปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินมีความต่างกันทางสถิติ โดยระดับปุ๋ยหมักที่ 1,000 กก./ไร่ มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินสูงสุด และมีค่าใกล้เคียงกับระดับปุ๋ยหมัก 2,000 และ 4,000 กก./ไร่ คือ 28.83, 22.58 และ 22.27 มก./กก. แต่ที่อายุ 6 สัปดาห์ ปริมาณปุ๋ยหมักที่ระดับต่างๆ ที่มีต่อปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ อีกทั้งไม่พบปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างการใส่เชื้อและปริมาณปุ๋ยหมักที่ระดับต่างๆ Smith and Read (2008) ได้อธิบายไว้ว่าการอยู่ร่วมกันแบบพึ่งพาอาศัยของไมคอร์ไรซาและพืช อยู่บนพื้นฐานของการแลกเปลี่ยนสารอาหารซึ่งกันและกัน โดยพืชจัดหาแหล่งคาร์บอนที่ราต้องการ และราดูดซึมฟอสฟอรัสในดินและธาตุอื่นๆ ให้พืช เป็นไปได้ว่าการใส่ปุ๋ยอินทรีย์จะช่วยเพิ่มแหล่งคาร์บอนให้รา ทำให้การดูดซึมฟอสฟอรัสดีขึ้น

ปริมาณมิเนอรัลไลเซชันของไนโตรเจนในดิน

ผลของการใส่ *G. aggregatum* ต่อปริมาณมิเนอรัลไรเซชันของไนโตรเจนในดิน พบว่าการใส่เชื้อและการไม่ใส่เชื้อต่อปริมาณมิเนอรัลไรเซชันของไนโตรเจนในดิน ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติในทุกอายุการเก็บเกี่ยว วีเอไมคอร์ไรซาส่งเสริมการดูดซึมสารไนโตรเจนอินทรีย์ ได้แก่ แอมโมเนียมและไนเตรต แต่การเกิดมิเนอรัลไรเซชันของไนโตรเจนในดินขึ้นอยู่กับแหล่งของสารไนโตรเจนอินทรีย์ในดิน Atul-Nayyar *et al*. (2009) พบว่าไมคอร์ไรซาจะเพิ่มการมิเนอรัลไรเซชันของไนโตรเจนในดินจากระดับสารอินทรีย์ที่แตกต่างกัน

เมื่อพิจารณาปริมาณปุ๋ยหมักที่ระดับต่างๆ ที่มีต่อปริมาณมิเนอรัลไรเซชันของไนโตรเจนในดินที่อายุ 2 สัปดาห์ ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ แต่ที่อายุ 4 และ 6 สัปดาห์ ปริมาณปุ๋ยหมักที่ระดับต่างๆ ส่งผลให้ปริมาณมิเนอรัลไรเซชันของไนโตรเจนในดินแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ โดยที่ระดับปุ๋ยหมัก 4,000 กก./ไร่ มีปริมาณมิเนอรัลไรเซชันของไนโตรเจนในดินสูงสุด คือ 6.52 และ 2.96 ppm ที่อายุ 4 และ 6 สัปดาห์ ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาถึงปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างการใส่เชื้อ และปริมาณปุ๋ยหมักที่ระดับต่างๆ ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ (Table 4) การมิเนอรัลไรเซชันของไนโตรเจนเป็นกระบวนการทางชีววิทยา จำนวนของไนโตรเจนที่จะปลดปล่อยให้พืชนั้น ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของอินทรียวัตถุ สารอินทรีย์ที่มีไนโตรเจนสูงและมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่ำ จะเกิดมิเนอรัลไลเซชันของไนโตรเจนดี เหมาะสำหรับการช่วยส่งเสริมการเจริญของพืช (Cordovil *et al*., 2005) ในปุ๋ยหมักกากตะกอนเยื่อกระดาษมีปริมาณอินทรียวัตถุมากและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่ำ จึงส่งผลต่อการเพิ่มมิเนอรัลไลเซชันของไนโตรเจนในดิน

Table 4 The effects of *Glomus aggregatum* and levels of organic fertilizer on N-mineralization in *Zea may* L. cultured soil

Treatment	N-mineralization (ppm)		
	2 week	4 week	6 week
Factor 1 (*Glomus aggregatum*)			
with	1.50	6.01	2.70
without	1.50	6.20	2.80
F-test	ns	ns	ns
Factor 2 (Organic fertilizer, kg/rai)			
0	1.51	5.90 [b]	2.60 [b]
1000	1.52	5.81 [b]	2.60 [b]
2000	1.50	6.13 [b]	2.70 [b]
4000	1.50	6.52 [a]	2.96 [a]
F-test	ns	**	**
Mycorrhiza × Organic fertilizer	ns	ns	ns
CV (%)	11.41	7.99	7.87

Statistically significant differences indicated with *p>0.05, **p>0.01 by Duncan's new multiple range test, ns : non-significant

การศึกษาน้ำหนักแห้งของราก ใบ และต้นของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

ผลการวิเคราะห์สถิติถึงผลของการใส่ *G. aggregatum* ต่อน้ำหนักแห้งราก ใบ และต้นของข้าวโพด พบว่าการใส่เชื้อและการไม่ใส่เชื้อไม่ทำให้น้ำหนักแห้งในส่วนของราก ใบ และต้นแตกต่างกันทางสถิติ (Table 5) ปริมาณปุ๋ยหมักที่ระดับต่างๆ ที่มีต่อน้ำหนักแห้งของรากและใบแตกต่างทางสถิติ การใส่ปุ๋ยหมัก 2,000 กก./ไร่ ทำให้น้ำหนักแห้งในส่วนของใบสูงสุดคือ 8.82 กรัม และใกล้เคียงกับการใส่ปุ๋ยหมัก 4,000 กก./ไร่ แต่พบว่าปริมาณปุ๋ยหมักที่ระดับต่างๆ ไม่ทำให้ส่วนน้ำหนักแห้งส่วนต้นแตกต่างกัน ส่วนน้ำหนักแห้งในส่วนของรากข้าวโพดสูงที่สุด คือ 17.34 กรัม พบในระดับปุ๋ยหมักที่ 4,000 กก./ไร่ เมื่อพิจารณาถึงปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างการใส่เชื้อและปริมาณปุ๋ยหมักที่ระดับต่างๆ ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

การใส่ปุ๋ยหมักเป็นการให้ธาตุอาหารพืช ทำให้รากพืชมีการเจริญเติบโตดี และส่งผลต่อการปรับปรุงโครงสร้างดิน โดยเพิ่มสัดส่วนของดินที่เป็นก้อนขนาดมากกว่า 2 mm และพบว่าในดินจะมีคาร์บอนและไนโตรเจนเพิ่มขึ้น 25-31 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใส่ต่อเนื่องกัน 3 ปี (Dayegamiye *et al*., 2010) อีกทั้งสารฮิวมิกที่เกิดจากการย่อยสลายปุ๋ยอินทรีย์ จะสามารถดูดซับประจุบวกจากสารละลายดิน สนับสนุนการทำงานของเส้นใยราไมคอร์ไรซา ในเรื่องของการดูดซับและการเคลื่อนย้ายธาตุอาหาร ส่งผลต่อการเจริญเติบโตที่ดีของพืช

Table 5 The effects of *Glomus aggregatum* and levels of organic fertilizer on dry weight in corn leaf, stem and root

Treatment	Dry weight (g)		
	Leaf	Stem	Root
Factor 1 (*Glomus aggregatum*)			
with	8.12	5.69	15.44
without	7.34	5.40	14.60
F-test	ns	ns	ns
Factor 2 (Organic fertilizer, kg/rai)			
0	6.50 [b]	5.13	13.24
1000	6.28 [b]	4.93	13.27 [cb]
2000	8.82 [a]	6.55	16.22 [c]
4000	9.33 [a]	5.55	17.34 [a]
F-test	*	ns	*
Mycorrhiza × Organic fertilizer	ns	ns	ns
CV (%)	22.93	12.94	29.56

Statistically significant differences indicated with *p>0.05, **p>0.01 by Duncan's new multiple range test, ns : non-significant

การดูดกินธาตุไนโตรเจนและธาตุฟอสฟอรัสในข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

ผลของการใส่และไม่ใส่ *G. aggregatum* ต่อปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในส่วนของราก ต้น และใบของข้าวโพด พบว่า การใส่และไม่ใส่เชื้อไม่ส่งผลให้ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดมีความแตกต่างทางสถิติ (Table 6) ส่วนปริมาณปุ๋ยหมักที่ระดับต่างๆ ทำให้ข้าวโพดในส่วนของราก มีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ โดยพบว่า เมื่อระดับปุ๋ยอินทรีย์สูงขึ้นทำให้ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในรากเพิ่มมากขึ้น กล่าวคือเมื่อข้าวโพดได้รับปริมาณปุ๋ยหมักที่ระดับ 4,000 กก./ไร่ ทำให้ปริมาณไนโตรเจนในส่วนของรากสูงสุด คือ 2.08 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีปริมาณสูงกว่าปริมาณปุ๋ยหมักที่ระดับ 2,000 และ 1,000 กก./ไร่ และการไม่ใส่ปุ๋ยหมักซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.84, 1.65 และ 1.51% ตามลำดับ ทำให้ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดของลำต้นและใบ ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ แต่การใส่ปุ๋ยหมักที่ระดับ 4,000 และ 2,000 กก./ไร่ มีค่าไนโตรเจนสูงกว่าการไม่ใส่ปุ๋ยหมัก

ไมคอร์ไรซาสามารถเข้าถึงแหล่งของสารไนโตรเจนอินทรีย์ได้ง่าย โดยเส้นใยราภายนอกจะดูดสารอาหารจากดิน และเคลื่อนย้ายมาสู่เส้นใยภายในรากพืช พืชเจ้าบ้านสามารถดูดซึมไนโตรเจนจากเส้นทางที่เชื่อมกับเส้นใยไมคอร์ไรซา (Bücking and Kafle 2015) ส่วนปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างการใส่ *G. aggregatum* และปริมาณปุ๋ยหมักที่ระดับต่างๆ ไม่ทำให้ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดแตกต่างกันทางสถิติ

Table 6 The effects of *Glomus aggregatum* and levels of organic fertilizer on total nitrogen corn leaf, stem and root

Treatment	Total nitrogen (%)		
	Leaf	Stem	Root
Factor 1 (*Glomus aggregatum*)			
with	2.64	1.81	1.85
without	2.50	1.61	1.69
F-test	ns	ns	ns
Factor 2 (Organic fertilizer, kg/rai)			
0	2.57	1.58	1.51 [b]
1000	2.35	1.55	1.65 [b]
2000	2.64	1.80	1.84 [b]
4000	2.73	1.90	2.08 [a]
F-test	ns	ns	**
Mycorrhiza × Organic fertilizer	ns	ns	ns
CV (%)	14.12	21.58	18.80

Statistically significant differences indicated with *p>0.05, **p>0.01 by Duncan's new multiple range test, ns : non-significant

ผลของการใส่และไม่ใส่ *G. aggregatum* ต่อปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด ในส่วนของราก ต้นและใบของข้าวโพด พบว่าการใส่และไม่ใส่เชื้อไม่ส่งผลให้ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดมีความแตกต่างทางสถิติ (Table 7) ปริมาณปุ๋ยหมักที่ระดับต่างๆ ทำให้ส่วนต้นและใบข้าวโพดมีปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ กล่าวคือ การใส่ปุ๋ยหมักที่ระดับ 4,000 กก./ไร่ ส่งผลทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดส่วนของต้นและใบข้าวโพดสูงสุด คือ 0.18 และ 0.17 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และการไม่ใส่ปุ๋ยหมักทำให้ต้นและใบข้าวโพดมีปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดน้อยที่สุดคือ 0.13 และ 0.14 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนปริมาณปุ๋ยหมักที่ระดับต่างๆ ไม่ทำให้รากข้าวโพดมีปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดแตกต่างกันทางสถิติ แต่การใส่ปุ๋ยหมักที่ระดับมากกว่า 1,000 กก./ไร่ ทำให้รากข้าวโพดมีปริมาณฟอสฟอรัสสูงกว่าระดับอื่นๆ เมื่อพิจารณาปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างการใส่เชื้อและปริมาณปุ๋ยหมักที่ระดับต่างๆ ทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด ไม่แตกต่างกันทางสถิติ

การใส่ปุ๋ยหมักจากกากตะกอนเยื่อกระดาษส่งผลต่อการดูดกินธาตุฟอสฟอรัส ทำให้มีปริมาณฟอสฟอรัสในใบและลำต้นสูง สอดคล้องกับ Nurlaeny *et al*. (1996) พบว่าข้าวโพดและถั่วเหลืองที่มีไมคอร์ไรซา มีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในต้นและรากสูงกว่าทรีตเมนต์ที่ไม่มีไมคอร์ไรซาอย่างมีนัยสำคัญ และพบว่าราวีเอไมคอร์ไรซามีบทบาทสำคัญที่ช่วยให้พืชมีปริมาณฟอสฟอรัสที่ดูดกินได้มากขึ้นและสอดคล้องกับ

Abu-Zeyad *et al*. (1999) ศึกษาผลของราวีเอไมคอร์ไรซาผลการดูดธาตุฟอสฟอรัสและการเคลื่อนย้ายธาตุอาหารจากส่วนรากไปยังลำต้นของ white clover (*Trifolium repens* L.) พบว่าความเข้มข้นของธาตุฟอสฟอรัสของลำต้น white clover ที่มีราวีเอไมคอร์ไรซาอาศัยอยู่เพิ่มขึ้น

Table 7 The effects of *Glomus aggregatum* and levels of organic fertilizer on total phosphorus corn leaf, stem and root

Treatment	Total phosphorus (%)		
	Leaf	Stem	Root
Factor 1 (*Glomus aggregatum*)			
with	0.15	0.16	0.09
without	0.15	0.14	0.08
F-test	ns	ns	ns
Factor 2 (Organic fertilizer, kg/rai)			
0	0.14[b]	0.13[b]	0.08
1000	2.35	1.55	1.65[b]
2000	0.15[ab]	0.16[ab]	0.10
4000	0.17[a]	0.18[a]	0.09
F-test	*	**	ns
Mycorrhiza × Organic fertilizer	ns	ns	ns
CV (%)	14.46	27.12	21.40

Statistically significant differences indicated with *p>0.05, **p>0.01 by Duncan's new multiple range test, ns : non-significant

สรุป

ราไมคอร์ไรซาที่อยู่ร่วมกับข้าวโพดเลี้ยงสัตว์และการใส่ปุ๋ยหมักกากตะกอนเยื่อกระดาษที่ระดับแตกต่างกันมีอิทธิพลต่อกิจกรรมของฟอสฟาเตส มิเนอรัลไลเซชันของไนโตรเจนในดิน โดยทำให้กิจกรรมของฟอสฟาเตสเพิ่มขึ้นหลังการใส่ปุ๋ยหมัก 2 สัปดาห์ ที่อัตรา 2,000 และ 4,000 กก./ไร่ และมีการมิเนอรัลไลเซชันของไนโตรเจนเพิ่มขึ้นหลังการใส่ปุ๋ยหมัก 4 และ 6 สัปดาห์ ที่อัตรา 4,000 กก./ไร่ ปุ๋ยหมักที่อัตรานี้ยังมีผลต่อการเพิ่มการเจริญเติบโตของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ทำให้มีน้ำหนักแห้งของใบและรากเพิ่มขึ้นและเพิ่มการดูดกินไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของข้าวโพด โดยทำให้ปริมาณไนโตรเจนที่ราก ฟอสฟอรัสที่ใบและลำต้นของพืชเพิ่มขึ้น ดังนั้นการใส่ปุ๋ยหมักกากตะกอนเยื่อกระดาษ นอกจากจะเป็นการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือใช้แล้ว ยังเป็นการเพิ่มอินทรียวัตถุให้กับดิน ผลจากการย่อยสลายสารอินทรีย์จะทำให้ได้ธาตุอาหารพืชและฮิวมัส ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืช นอกจากนี้ยังเป็นแหล่งคาร์บอนให้ราวีเอไมคอร์ไรซา ช่วยเพิ่มกิจกรรมของเอนไซม์เอซิดฟอสฟาเตส จึงส่งผลให้เพิ่มการดูดซึมฟอสฟอรัส ไนโตรเจนและธาตุอื่น

เอกสารอ้างอิง

ทัศนีย์ อัตตะนันทน์ และจงรักษ์ จันทร์เจริญสุข. 2542. แบบฝึกหัดและคู่มือปฏิบัติการวิเคราะห์ดินและพืช. ภาควิชาปฐพีวิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 108 น.

ธงชัย มาลา, สิรินภา ช่วงโอภาส, ชวลิต ฮงประยูร และวัทนีย์ พึ่งแสง. 2551. ปฏิบัติการจุลินทรีย์ทางดิน. ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร กำแพงแสน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, นครปฐม. 143 น.

ธงชัย มาลา. 2550. ปุ๋ยอินทรีย์และปุ๋ยชีวภาพ: เทคนิคการผลิตและการใช้ประโยชน์. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 300 น.

วชิระ แสงรัศมี. 2555. การพัฒนาบล็อกประสานน้ำหนักเบาจากเยื่อกระดาษเหลือทิ้ง. โครงการจัดประชุมวิชาการ. 12-20 น.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2548. มาตรฐานอุตสาหกรรม. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ.

พรฤดี สงวนสุข. 2552. การพัฒนาบรรจุภัณฑ์กระถางจากกากตะกอนน้ำมันปาล์มและกากตะกอนเยื่อกระดาษจากบ่อบำบัดน้ำเสียสำหรับกล้าไม้. บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 142 น.

Abu-Zeyad, R., A.G. Khan and C. Khoo. 1999. Occorrence of arbuscular mycorrhiza in Castanospermum australe A. Cunn & C. Fraser and effects on growth and production of castanospermine. Mycorrhiza. 9: 111-117.

Alef, K., and P. Nannipieri. 1995. Methods in applied soil microbiology and biochemistry. Academic Press Filey, London. 576 p.

Chang, E. H., R. S. Chung, and Y. H. Tsai. 2007. Effect of different application rates of organic fertilizer on soil enzyme activity and microbial population. J. Soil Sci. Plant. Nutr. 53: 132-140.

Dayegamiye, A., A. Drapeau, and C. Nduwamungu. 2010. Fresh and composted paper sludges sustain soil productivity. Int. J. Agron. 2010: 1-10.

Giovannetti, M., and B. Mosse. 1979. An evaluation of techniques for measuring vesicularn arbuscular mycorrhizal infection in roots. New Phytol. 84: 489-500.

Guo, W., R. Zhao, R. Fu, N. Bi, L. Wang, W. Zhao, J. Guo, and J. Zhang. 2014. Contribution of arbuscular mycorrhizal fungi to the development of maize (*Zea mays* L.) grown in three types of coal mine spoils. Environ. Sci. Pollut. Res. 21: 3592-3603.

Kapri, A., and L. Tewari. 2010. Phosphate solubilisation potential and phosphatase activity of rhizospheric Trichoderma spp. Braz. J. Microbiol. 41: 787-795.

Mala, T., S. Chotchuangmaneerat, W. Phuengsaeng, and J. Phumphet. 2010. Efficiency of *Glomus aggregatum*, Azotobacter, Azospirillum and chemical fertilizer on growth and yield of single cross hybrid 4452 Maize. Kasetsart J. (Nat. Sci.) 44: 789-799.

Margesin, R., and F. Schinner. 1994. Phosphomonoesterase, phosphodiesterase, phosphotriesterase, and inorganic pyrophosphatase activities in forest soils in an alpine area: effect of pH on enzyme activity and extractability. Biol. Fert. Soils. 18: 320-326.

Nurlaeny, N., H. Marschner and E. George. 1996. Effect of liming and mycorrhizal colonization on soil phosphorus depletion and phosphate uptake by maize (*Zea mays* L.) and soybean (*Glycine max* L.) grown in two tropical acid soils. Plant Soil. 181: 275-285.

Phillips, J. M., and D. S. Hayman. 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.

Sharma, S. B., R. Z. Sayyed, M. H. Trivedi, and T. A. Gobi. 2013. Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. Springer Plus. 2: 1-14.

Sousa, C. d. S., R. S. C. Menezes, E. V. d. S. B. Sampaio, F. Oehl, L. C. Maia, M. d. S. Garrido and F. d. S. Lima. 2012. Occurrence of arbuscular mycorrhizal fungi after organic fertilization in maize, cowpea and cotton intercropping systems. Acta. Sci. Agron. 34: 149-156.

Tanaka, Y., and K. Yano. 2005. Nitrogen delivery to maize via mycorrhizal hyphae depends on the form of N supplied. Plant cell Environ. 28: 1247-1254.

Tiamtanong, S., K. Sinma, T. Mala, P. Rungcharoenthong and S. Amkha. 2015. Effects of mycorrhizal fungi with phosphate fertilizer applications on phosphate solubilizing and soil properties of grapes orchard. Modern Applied Sci. 9: 149-156.

Dighton, J. 1983. Phosphatase production by mycorrhizal fungi. J. Plant Soil. 71: 455.

Amaya-carpio, L., F.T. Davies, T. Fox, and C. He. 2009. Arbuscular mycorrhizal fungi and organic fertilizer influence photosynthesis, root phosphatase activity, nutrition, and growth of *Ipomoea carnea* ssp. Fistulosa. Photosynthetica. 47: 1-10.

Negrete-Yankelevich, S., I.E. Maldonado-Mendoza, J.O. Lázaro-Castellanos, W. Sangabriel-Conde, J.C. Martínez-Álvarez. 2013. Arbuscular mycorrhizal root colonization and soil P availability are positively related to agrodiversity in Mexican maize polycultures. Biol. Fertil. Soils. 49: 201-212.

Soro, D., K. Ayolié, F.G.B. Zro, F.Y. Yéboua, H.K.K. Kouadio, S. Bakayoko, P.T. Angui and J.Y. Kouadio. 2015. Impact of organic fertilization on maize (*Zea mays* L.) production in a ferralitic soil of centre-west côte d'ivoire. JEBAS, 3: 556-565.

Qiao, X., S. Bei, C. Li, Y. Dong, H. Li, P. Christie, F. Zhang and J. Zhang. 2015. Enhancement of faba bean competitive ability by arbuscular mycorrhizal fungi is highly correlated with dynamic nutrient acquisition by competing wheat. Scientific Reports. 5: 1-10.

Smith, S.E., D.J. Read. 2008. Mycorrhizal Symbiosis, Ed 3. Academic Press, New York. 787 p.

Roy-Bolduc, A., and M. Hijr. 2010. The use of mycorrhizae to enhance phosphorus uptake: a way out the phosphorus crisis. J. Biofertil. Biopestic. 2: 1-5.

Cordovil, C.M.d.S., J. Coutinho, M. Goss and F. Cabral. 2005. Potentially mineralizable nitrogen from organic materials applied to a sandy soil: fitting the one-pool exponential model. Soil Use Manage. 21: 65-72.

Medina, M.J.H., H. Gagnon, Y. Piché, J.A. Ocampo, J.M.G. Garrido, H. Vierheilig. 2003. Root colonization by arbuscular mycorrhizal fungi is affected by the salicylic acid content of the plant. Plant Science. 164: 993-998.

Salyards, J.R., R.Y. Evans, A.M. Berry. 2003. Mycorrhizal development and plant growth in Inoculated and non-inoculated plots of california native grasses and shrubs. Native Plants. 4: 143-149.

Atul-Nayyar, A., C. Hamel, K. Hanson, J. Germida. 2009. The arbuscular mycorrhizal symbiosis links N mineralization to plant demand. Mycorrhiza. 19: 239-46.

Bücking, H., and A. Kafle. 2015. Role of arbuscular mycorrhizal fungi in the nitrogen uptake of plants: current knowledge and research gaps. Agronomy. 5: 587-612.