ห้องสมุดกรมพัฒนาที่ดิน

เอกสารวิชาการ

เรื่อง

การใช้ประโยชน์จุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9 ในดินกรดจัด
Utilization of Microbial activator Super LDD9 in Acid Soil.

โดย

นายวุฒิชัย จันทรสมบัติ

กลุ่มวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีชีวภาพการจัดการมลพิษทางดินและน้ำ
กองเทคโนโลยีชีวภาพทางดิน
กรมพัฒนาที่ดิน

เอกสารวิชาการกองเทคโนโลยีชีวภาพทางดิน
ฉบับที่ 0836-04 Res 58.01

ห 9757

ห้องสมุดกรมพัฒนาที่ดิน

เอกสารวิชาการ

เรื่อง

ห้องสมุดกรมพัฒนาที่ดิน
วันที่ 07 ก.ย. 2560
เลขหมู่ 631.87 ก816ก
เลขทะเบียน ห9757

การใช้ประโยชน์จุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9 ในดินกรดจัด
Utilization of Microbial activator Super LDD9 in Acid Soil.

โดย

นายวุฒิชัย จันทรสมบัติ

กลุ่มวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีชีวภาพการจัดการมลพิษทางดินและน้ำ
กองเทคโนโลยีชีวภาพทางดิน
กรมพัฒนาที่ดิน

631.87
ก865
ฉบับสำเนา

เอกสารวิชาการกองเทคโนโลยีชีวภาพทางดิน
ฉบับที่ 0836-04 Res 58.01
ปี 2558

ห้องสมุดกรมพัฒนาที่ดิน

สารบัญ

หน้า

สารบัญ (1)
สารบัญตาราง (2)
สารบัญภาพ (3)
บทที่ 1 บทนำ
1.1 หลักการและเหตุผล 1
1.2 วัตถุประสงค์ 3
1.3 สถานที่ดำเนินงาน 3
1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน 3
บทที่ 2 การตรวจเอกสาร
2.1 สถานะของฟอสฟอรัสในดิน 4
2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดยึดฟอสฟอรัสในดิน 4
2.3 การจัดการดินเพื่อเพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดินกรดจัด 7
2.4 จุลินทรีย์ละลายอนินทรีย์ฟอสเฟต 9
บทที่ 3 ผลการศึกษา
3.1 การแยกจุลินทรีย์ละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตซุปเปอร์ พด.9 15
3.2 การคัดเลือกแบคทีเรียละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตซุปเปอร์ พด.9 15
3.3 ประโยชน์การใช้จุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9 20
3.4 ข้อจำกัดการใช้จุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9 21
3.5 การใช้แบคทีเรียในกลุ่ม *Burkholderia* sp. เพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดินและผลผลิตพืช 22
บทที่ 4 สรุปผลการศึกษา ข้อเสนอแนะ และประโยชน์ที่ได้รับ
4.1 สรุปผลการศึกษา 29
4.2 ข้อเสนอแนะ 30
4.3 ประโยชน์ที่ได้รับ 30
เอกสารอ้างอิง 32

ห้องสมุดกรมพัฒนาที่ดิน

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	สมบัติทางเคมีของดิน ผลผลิตข้าว และผลตอบแทนทางเศรษฐกิจ	9
2	ชนิดของจุลินทรีย์ละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตในดิน	10
3	สถานที่เก็บตัวอย่าง และจำนวนแบคทีเรียละลายฟอสเฟต	15
4	ระดับความกว้างของบริเวณใสรอบโคโลนี	16
5	ประสิทธิภาพการละลายแคลเซียมฟอสเฟตในอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดเหลว	16
6	ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์จากการละลายแคลเซียมฟอสเฟต	17
7	ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์จากการละลายเหล็กฟอสเฟต	18
8	ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์จากการละลายอะลูมินั่มฟอสเฟต	18
9	ปริมาณจุลินทรีย์ละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตในอาหารเลี้ยงเชื้อที่เติมเหล็กและอะลูมินั่มฟอสเฟตที่ 4 ระดับความเป็นกรดเป็นด่าง	19
10	ปริมาณจุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9 ที่ขยายเพิ่มปริมาณในปุ๋ยหมัก	19
11	ผลของแบคทีเรีย *Burkholderia cepacia* ต่อการเจริญเติบโตของข้าวโพด	23
12	ผลของแบคทีเรียละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตข้าว	24
13	อิทธิพลของจุลินทรีย์ละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตต่อปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ การเจริญเติบโตและผลผลิตข้าว	25
14	ผลของจุลินทรีย์ละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตต่อการเจริญเติบโต และการดูดใช้ฟอสฟอรัสของพริกไทย	26
15	ผลของจุลินทรีย์ละลายอนินทรีย์ละลายฟอสเฟตต่อการเจริญเติบโตของข้าว	27
16	ผลของปุ๋ยชีวภาพละลายอนินทรีย์ฟอสเฟต หินปูน และหินบะซอลต์ ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดิน	28
17	ผลของปุ๋ยชีวภาพละลายอนินทรีย์ฟอสเฟต หินปูน และหินบะซอลต์ ต่อการเจริญและผลผลิตข้าว	28

ห้องสมุดกรมพัฒนาที่ดิน

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	การเกาะยึดฟอสเฟตไอออนบนพื้นผิวอนุภาคออกไซด์ของโลหะ	6
2	แสดงขั้นตอนการคัดเลือกและทดสอบประสิทธิภาพจุลินทรีย์ละลายอนินทรีย์ฟอสเฟต	14

บทที่ 1
บทนำ

1.1 หลักการและเหตุผล

ปัจจุบันทรัพยากรดินของประเทศไทยมีแนวโน้มเสื่อมโทรมลง เนื่องจากการใช้ที่ดินอย่างไม่เหมาะสมและขาดการบำรุงดินอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ดินบางพื้นที่ยังเป็นดินที่มีปัญหาต่อการใช้ประโยชน์ทางการเกษตร เช่น ดินเค็ม ดินทราย ดินตื้น ดินที่มีสภาพกรด และดินเปรี้ยวจัด เป็นต้น ประมาณ 182 ล้านไร่ หรือคิดเป็นร้อยละ 56.8 (กรมพัฒนาที่ดิน, 2558) โดยเฉพาะพื้นที่ดินที่มีสภาพเป็นกรดจัดมีพื้นที่ประมาณ 95.4 ล้านไร่ (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553) ที่มีระดับความเป็นกรดของดินที่มีผลกระทบต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตพืชอยู่ในระดับต่ำกว่า 5.5 และดินเปรี้ยวจัดมีพื้นที่ประมาณ 5.7 ล้านไร่ (กรมพัฒนาที่ดิน, 2558) ซึ่งดินดังกล่าวเป็นดินที่มีการพัฒนาการเป็นระยะเวลานาน ดินที่ผ่านการชะล้างสูง ทำให้มีธาตุประจุบวกที่เป็นด่างในดินมีปริมาณน้อยมาก ดินที่มีสภาพเป็นกรดส่วนใหญ่มีเนื้อดินค่อนข้างหยาบถึงหยาบ มีการสะสมของเหล็ก อะลูมินั่มหรือแมงกานีสออกไซด์สูง ทำให้ธาตุอาหารพืชบางชนิดมีแนวโน้มขาดแคลน เช่น แคลเซียม แมกนีเซียม โพแทสเซียม โดยเฉพาะฟอสฟอรัส ซึ่งจะอยู่ในรูปที่พืชไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ ดินจึงมีความอุดอมสมบูรณ์ต่ำ ขณะที่ธาตุอาหารบางชนิดละลายออกมามากจนเป็นพิษต่อระบบรากพืช เช่น อะลูมินั่ม แมงกานีส และเหล็ก เป็นต้น ปัจจัยต่างๆ เหล่านี้ส่งผลกระทบโดยตรงต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของพืช และเป็นผลทางอ้อมต่อการเจริญเติบโตและกิจกรรมของจุลินทรีย์ดินที่เป็นประโยชน์หลายชนิด ขณะที่พื้นที่ดังกล่าวเกษตรกรใช้ประโยชน์ในการปลูกข้าว พืชผัก ไม้ผล และปาล์มน้ำมัน เป็นต้น ซึ่งพืชเหล่านี้เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศ

การจัดการดินที่มีสภาพเป็นกรดจัดและดินเปรี้ยวจัด โดยทั่วไปใช้วิธีการใส่วัสดุปูน เช่น ปูนขาว ปูนมาร์ล หินปูน และปูนโดโลไมท์ เป็นต้น เพื่อยกระดับความเป็นกรดเป็นด่างของดินให้เหมาะสมต่อการปลูกพืชประมาณ 5.5-6.0 (เจริญ, 2540) โดยดินที่มีสภาพเป็นกรดรุนแรงเล็กน้อยถึงกรดปานกลาง (pH 4.0-5.0) ใช้ปูนในอัตราประมาณ 0.5-1.0 ตันต่อไร่ สำหรับดินที่ดอนที่มีเนื้อหยาบใช้อัตราประมาณ 200-400 กิโลกรัมต่อไร่ (กรมพัฒนาที่ดิน, 2550) อย่างไรก็ตามการใส่วัสดุปูนที่ถูกต้องควรใส่ตามปริมาณค่าความต้องการปูนของดิน ซึ่งจะแตกต่างกันตามปริมาณกรดทั้งหมดและชนิดของดินในแต่ละพื้นที่ การใส่วัสดุปูนสามารถช่วยให้พืชเจริญเติบโตและให้ผลผลิตสูงขึ้น ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ปุ๋ยเคมี และเพิ่มกิจกรรมของจุลินทรีย์ดิน นอกจากนี้ยังมีการจัดการดินอื่นๆ เช่น การใช้ปุ๋ยเคมีเพิ่มธาตุอาหารในดิน การเพิ่มอินทรียวัตถุในดิน เช่น ปุ๋ยหมัก ปุ๋ยคอก และพืชปุ๋ยสด เป็นต้น โดยปุ๋ยอินทรีย์เหล่านี้จะช่วยเพิ่มความอุดมสมบูรณ์แก่ดิน เป็นแหล่งพลังงานและคาร์บอนแก่จุลินทรีย์ดิน ส่งผลให้มีปริมาณและกิจกรรมของจุลินทรีย์เพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะกระบวนการเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงธาตุอาหารในดิน และยังช่วยยกระดับความเป็นกรดเป็นด่างของดินให้สูงขึ้น ลดปริมาณอะลูมินั่มที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน วิธีการจัดการอนุรักษ์หน้าดินลดการชะล้างและรักษาความชื้นของหน้าดิน และการใช้พืชพันธุ์ที่มีความทนทานต่อสภาพความเป็นกรด เช่น สับปะรด ข้าวโพด ถั่วเหลือง และมันสำปะหลัง เป็นต้น

แต่เนื่องจากการจัดการดินกรดจัดและดินเปรี้ยวจัด โดยวิธีการใส่ปูนถึงแม้จะเป็นวิธีที่ง่าย สะดวก และสามารถปรับความเป็นกรดเป็นด่างของดินและเพิ่มธาตุอาหารพืชให้สูงขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่วัสดุปูนต่างๆ ที่ใช้ในการเกษตร เป็นวัสดุธรรมชาติที่ใช้แล้วสูญสิ้นไปและต้องซื้อ ซึ่งบางพื้นที่ไม่สามารถหาแหล่งจำหน่ายปูนเหล่านี้ได้ ทำให้เกษตรกรบางรายไม่นิยมใช้ปูนในการปรับปรุงดิน แต่จะใช้วิธีการใส่ปุ๋ยเคมีเพื่อเพิ่มธาตุอาหารในดินให้มากขึ้น ขณะที่การใส่ปุ๋ยเคมีในดินที่มีสภาพเป็นกรดจัดและดินเปรี้ยวจัด โดยเฉพาะปุ๋ยเคมีฟอสฟอรัส พบว่าส่วนใหญ่กว่าร้อยละ 80 ของปุ๋ยเคมีฟอสฟอรัสที่ใส่ลงไปในดิน จะทำปฏิกิริยากับแร่ธาตุต่างๆ ในดิน และแปรสภาพเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำยาก พืชไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ เป็นการสูญเสียปุ๋ยเคมีและเพิ่มต้นทุนการผลิตของเกษตรกรโดยเปล่าประโยชน์ ขณะที่ปุ๋ยเคมีดังกล่าวต้องซื้อ มีราคาแพง และต้องนำเข้าจากต่างประเทศ โดยในปี 2554 ประเทศไทยมีการนำเข้าปุ๋ยเคมี 3.4 ล้านตัน คิดเป็นมูลค่า 42,666 ล้านบาท ขณะที่ในปี 2557 มีการนำเข้าเพิ่มขึ้นเป็น 5.4 ล้านตัน คิดเป็นมูลค่า 66,103 ล้านบาท (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2558) แสดงให้เห็นว่าประเทศไทยมีการใช้ปุ๋ยเคมีเพื่อเพิ่มผลผลิตทางการเกษตรในปริมาณที่สูงขึ้นเรื่อยๆ ทำให้ต้นทุนการผลิตของเกษตรกรเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องหาแนวทางในการจัดการดินที่มีสภาพเป็นกรดจัดและดินเปรี้ยวจัด ที่มีประสิทธิภาพและไม่เพิ่มต้นทุนการผลิตของเกษตรกร

การใช้จุลินทรีย์ละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่สามารถเพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดินที่มีสภาพเป็นกรดจัดและดินเปรี้ยวจัด โดยกลุ่มจุลินทรีย์ละลายอนินทรีย์ฟอสเฟต (Phosphate Solubilizing Microorganism; PSM) เป็นจุลินทรีย์ดินที่มีความสามารถในการละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตที่อยู่ในรูปสารประกอบอนินทรีย์ฟอสเฟตที่ไม่ละลายน้ำให้อยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ และเป็นประโยชน์แก่พืช จุลินทรีย์เหล่านี้มีหลายชนิดทั้งที่เป็นแบคทีเรียและเชื้อรา เช่น *Aspergillus* sp., *Penicillium* sp., *Pseudomonas* sp., *Azospirillum* sp., *Bacillus* sp., *Rhizobium* sp., *Burkholderia* sp., *Arthrobacter* sp., *Alcaligenes* sp., *Serratia* sp., *Enterobacter* sp., *Acinetobacter* sp., *Flavobacterium* sp. และ *Erwinia* sp. เป็นต้น (Illmer and schinner, 1992; Panhwar *et al*., 2012; Karpagam and Nagalakshmi, 2014) จุลินทรีย์เหล่านี้สามารถพบได้ทั่วไปในพื้นที่เกษตรกรรม และพื้นที่ป่าไม้ โดยเฉพาะดินบริเวณรากพืช แต่ชนิดและปริมาณของจุลินทรีย์ขึ้นอยู่กับชนิดของดินและการใช้ประโยชน์ที่ดิน (อาภารัตน์, 2549) จุลินทรีย์กลุ่มดังกล่าวมีการนำมาผลิตเป็นปุ๋ยชีวภาพและใช้ประโยชน์ทางการเกษตรอย่างกว้างขวาง โดยสามารถเพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดิน สามารถช่วยลดการใช้ปุ๋ยเคมีและเป็นแนวทางการเพิ่มผลผลิตพืชที่ไม่มีผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตของเกษตรกร เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ในการนี้กรมพัฒนาที่ดินจึงได้ดำเนินการวิจัย คัดเลือกจุลินทรีย์ละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตที่สามารถเจริญเติบโตและมีกิจกรรมการละลายฟอสฟอรัสที่ถูกดูดยึดในดินที่มีสภาพเป็นกรดจัดและดินเปรี้ยวจัด และได้พัฒนาเป็นปุ๋ยชีวภาพละลายอนิทรีย์ฟอสเฟต โดยใช้ชื่อผลิตภัณฑ์ว่า จุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9 สามารถเจริญเติบโตและมีกิจกรรมได้ดีในดินที่มีสภาพเป็นกรดจัดและเปรี้ยวจัด 3.5-6.0 มีประสิทธิภาพละลายแคลเซียมฟอสเฟตได้ 826.44 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถละลายเหล็กฟอสเฟตได้ 22.00 มิลลิกรัมต่อลิตร และละลายอะลูมินั่มฟอสเฟตได้ 20.60 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งจุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9 เป็นอีกทางเลือกหรือปัจจัยร่วมในการจัดการดินที่มีสภาพกรดจัด

และเปรี้ยวจัด เพื่อเพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดิน เพิ่มประสิทธิภาพการใช้ปุ๋ย ลดปริมาณการใช้ปูนและปุ๋ยเคมี และสามารถช่วยลดต้นทุนการผลิตของเกษตรกร

1.2 วัตถุประสงค์

1) เพื่อรวบรวมข้อมูลการแยก คัดเลือก ประโยชน์และข้อจำกัดการใช้จุลินทรีย์ละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตซุปเปอร์ พด.9

2) เพื่อรวบรวมข้อมูลผลการวิจัย ผลงานวิชาการ และบทความวิชาการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการใช้จุลินทรีย์ละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตในดินที่มีสภาพความเป็นกรดเป็นด่างที่ระดับต่างๆ

1.3 สถานที่ดำเนินงาน

กลุ่มวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีชีวภาพการจัดการมลพิษทางดินและน้ำ กองเทคโนโลยีชีวภาพทางดิน กรมพัฒนาที่ดิน

1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน

1) รวบรวมข้อมูลการแยกและคัดเลือกจุลินทรีย์ละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตซุปเปอร์ พด.9

2) รวบรวมข้อมูลการใช้ประโยชน์ และข้อจำกัดต่างๆ ของการใช้จุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9

3) รวบรวมข้อมูลผลงานวิจัย ผลงานวิชาการ และบทความวิชาการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการใช้จุลินทรีย์ละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตในดินที่มีสภาพเป็นกรดเป็นด่างที่ระดับต่างๆ

4) วิเคราะห์ สังเคราะห์ และประมวลผลข้อมูลที่รวบรวมมาได้

5) สรุปผลการศึกษา เรียบเรียงและจัดทำรายงานผลการศึกษา

บทที่ 2
การตรวจเอกสาร

2.1 สถานะของฟอสฟอรัสในดิน

ฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นอย่างยิ่งต่อการเจริญเติบโตของพืช หากดินมีปริมาณฟอสฟอรัสไม่เพียงพอต่อความต้องการของพืช จะส่งผลต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตพืช ฟอสฟอรัสในดินมีอยู่ 2 รูป คือ อินทรีย์ฟอสเฟต (organic phosphate) เป็นวัสดุอินทรีย์ต่างๆ ที่ร่วงหล่นและทับถมอยู่บนดิน เมื่อมีการสลายตัวของวัสดุอินทรีย์เหล่านี้ จะมีการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์แก่พืช และอนินทรีย์ฟอสเฟต (inorganic phosphate) เป็นพวกหินแร่ต่างๆ เช่น แร่อะพาไทต์ (apatite) เป็นต้น โดยเมื่อเกิดการผุพังสลายตัวธาตุฟอสฟอรัสที่เป็นองค์ประกอบแร่จะถูกปลดปล่อยสู่สารละลายดินพืชสามารถดูดใช้ได้

อนินทรีย์ฟอสเฟตในดินจะอยู่ในรูปไอออนในสารละลายดิน รูปสารละลายที่ไม่ละลายน้ำและรูปที่ถูกดูดยึดที่ผิวไฮดรัสออกไซด์ของเหล็ก อะลูมินั่ม และแร่ดินเหนียวซิลิเกต แต่หากแบ่งตามความเป็นประโยชน์ต่อพืชสามารถแบ่งได้ 3 รูป คือ

1) รูปที่พืชใช้ประโยชน์ได้ทันที (readily available phosphate) ได้แก่ โมโนเบสิคออร์โทฟอสเฟต (monobasic orthodiphosphate; $H_2PO_4^-$) และไดเบสิคออร์โทฟอสเฟต (dibasic orthophosphate; HPO_4^{2-})

2) รูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชอย่างช้าๆ (slowly available phosphate) จะอยู่ในรูปสารประกอบแคลเซียม เหล็ก และอะลูมินั่มฟอสเฟต ซึ่งจะค่อยๆ ปลดปล่อยออกมาเป็นประโยชน์ต่อพืช

3) รูปที่พืชใช้ประโยชน์ได้ช้ามาก (non-labile phosphate) ส่วนใหญ่อนินทรีย์ฟอสเฟตจะอยู่ในรูปนี้ โดยจะถูกดูดยึดอย่างแข็งแรงกับไฮดรัสออกไซด์ของเหล็กและอลูมินั่ม (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548) สอดคล้องกับ Kannapiran and Ramkumar (2011) กล่าวว่าฟอสฟอรัสส่วนใหญ่ 95-99 เปอร์เซ็นต์ จะอยู่ในรูปที่พืชใช้ประโยชน์ไม่ได้มีเพียง 0.1 เปอร์เซ็นต์ เท่านั้นที่พืชสามารถใช้ประโยชน์ได้ (Zhou *et al*., 1992)

2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดยึดฟอสฟอรัสในดิน

คณาจารย์ภาควิชาปฐีวิทยา (2548) ปัทมา (2543) และเพิ่มพูน (2542) ได้อธิบายว่า การดูดยึดฟอสฟอรัสในดินส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นการดูดยึดแบบจำเพาะ (specific adsorption) โดยเป็นการดูดยึดในลักษณะการเกิดพันธะขึ้นระหว่างแอนไอออนกับธาตุโลหะ ซึ่งฟอสฟอรัสจะเข้าไปแลกเปลี่ยนตำแหน่งกับลิแกนด์ (ligand) ของธาตุโลหะที่เป็นองค์ประกอบของแร่ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นกลุ่มไฮดรอกซิลและโมเลกุลของน้ำ โดยการแลกเปลี่ยนลิแกนดจะทำให้เกิดพันธะเคมีระหวางแอนไอออนกับธาตุโลหะนั้น (ภาพที่ 1) ซึ่งปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการดูดยึดฟอสฟอรัสในดินมีดังนี้

1) กลุ่มแร่ดินเหนียว เช่น แรดินเหนียวพวกเคโอลิไนท์ (kaolinite) มอลโมริโลไนท์ (montmorillonite) และ อิลไลท์ (illite) จะดูดยึดฟอสเฟตโดยการทำปฏิกิริยากับไอออนฟอสเฟตโดยกระบวนการเซอร์เฟสรีแอคชั่น (surface reaction) โดยไอออนฟอสเฟตจะเขาแทนที่กลุ่มไฮดรอกไซด์ (hydroxy group) ที่อยูรอบๆ ผิวผลึกของแรดินเหนียวซิลิเกต แลวไอออนฟอสเฟตจะ

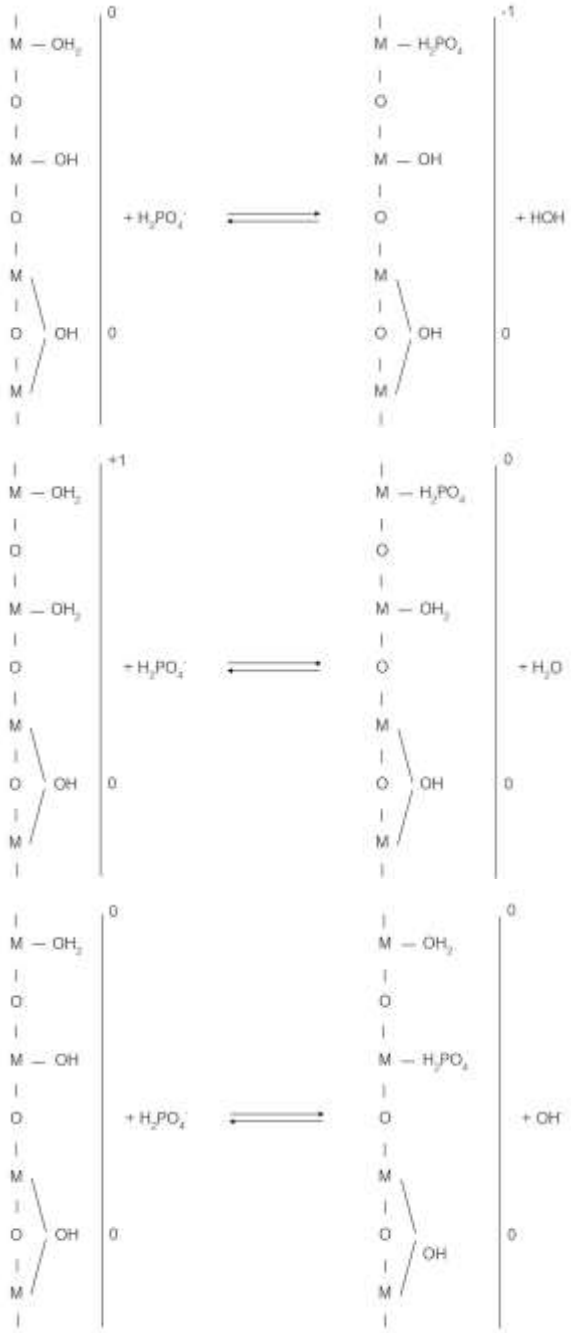
ทำปฏิกิริยากับอะตอมของอะลูมินั่ม หรือเหล็กในโครงสร้างแรซิลิเกต ทำให้ไอออนฟอสเฟตกลายเปนองคประกอบของแรดินเหนียว

2) ปริมาณของออกไซด์ ไฮดรอกไซด์ และไฮดรัสออกไซด์ของเหล็กและอะลูมินั่มในดิน การดูดยึดฟอสเฟตกับออกไซด์ ไฮดรอกไซด์ และไฮดรัสออกไซด์ของเหล็กและอะลูมินั่มจะเกิดขึ้นที่ผิวคอยลอยด์ดินและสามารถเกิดขึ้นได้เสมอขึ้นอยู่กับชนิดของประจุบนผิวของแร่ดินเหนียว การที่ฟอสเฟตซึ่งเป็นธาตุประจุลบ สามารถยึดเกาะบนพื้นผิวที่เป็นประจุลบเหมือนกันได้ เนื่องจากฟอสเฟตมีไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบและสามารถแตกตัวให้ไฮโดรเจนไอออนได้

3) เนื้อดิน ส่วนใหญ่ดินที่มีเนื้อดินปานกลางถึงละเอียด จะมีส่วนประกอบทางแร่เป็นกลุ่มอสัณฐาน (amorphous) โดยพบในอันดับดินออกซิซอลล์ (Oxisols) อัลติซอลล์ (Ultisols) และแอลฟิซอลล์ (Alfisols) ซึ่งส่วนใหญ่มีส่วนประกอบทางแร่เป็นออกไซด์ของเหล็กและอะลูมินั่ม โดยดินในอันดับดินออกซิซอลล์ (Oxisols) เป็นดินที่ดูดยึดฟอสเฟตสูง เพราะมีปริมาณเซสควิออกไซด์มาก และมักมีเนื้อดินปานกลางถึงละเอียด ดินพวกนี้จำกัดตัวอยู่ในเขตร้อนเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งประกอบด้วยเหล็กและอะลูมินั่มออกไซด์ ทำให้ฟอสฟอรัสถูกดูดยึดในรูปของเหล็กและอะลูมินั่มฟอสเฟต การดูดยึดจะขึ้นอยู่กับความมากน้อยของธาตุทั้งสองชนิด ในประเทศไทยพบในชุดดินโชคชัย ซึ่งเป็นดินที่ถือกำเนิดจากหินบะซอลต์ เป็นต้น อันดับดินอัลทิซอลล์ (Ultisols) มีเนื้อละเอียดและมีเซสควิออกไซด์มาก ทำให้สามารถดูดยึดอนินทรีย์ฟอสเฟตได้มาก โดยส่วนใหญ่พบมากในดินทรายภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ดินชั้นบนไม่ดูดยึดฟอสเฟต แต่จะถูกดูดยึดสะสมอยู่ในดินชั้นล่างประมาณ 20-30 เซนติเมตร ลงไป ซึ่งดินจะมีเนื้อละเอียดมากกว่าดินชั้นบน โดยฟอสเฟตจะถูกดูดยึดในรูปของเหล็กและอะลูมินั่มฟอสเฟต

4) ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดิน ฟอสเฟตจะถูกดูดยึดอย่างรวดเร็วในดินที่มีสภาพเป็นกรด โดยการทำปฏิกิริยาตกตะกอนกับเหล็กและอะลูมินั่มในสารละลายดิน ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดินต่ำ จะมีเหล็กและอะลูมินั่มออกไซด์ในสารละลายดินสูง ฟอสเฟตจะถูกดูดยึดด้วยพลังงานที่สูง ซึ่งเป็นการดูดยึดทางเคมี (chemisorption) ในขณะที่ดินที่มีค่าความเป็นกรดเป็นด่างสูงขึ้น กิจกรรมของไอออนเหล่านี้จะลดลง ฟอสเฟตจะถูกดูดยึดที่ระดับพลังงานต่ำหรืออาจเป็นการดูดยึดทางฟิสิกส์ (physical sorption) ในกรณีดินที่มีค่าความเป็นกรดเป็นด่างต่ำกว่า 5 ฟอสเฟตจะทำปฏิกิริยากับไฮดรัสออกไซด์ของเหล็กและอะลูมินั่ม เกิดเป็นสารประกอบฟอสเฟตที่ไม่ละลายน้ำ

5) ปัจจัยอื่นๆ เช่น ไอออนในดิน ทั้งไอออนประจุบวกและประจุลบมีอิทธิพลต่อการดูดยึดและการปลดปล่อยอนินทรีย์ฟอสเฟตในดิน โดยทั่วไปการดูดยึดอนินทรีย์ฟอสเฟตจะสูงขึ้น เมื่อความเข้มข้นของเกลือเพิ่มขึ้น ซึ่งมีไอออนประจุบวก 2 วาเลนซี่ เพิ่มการดูดยึดอนินทรีย์ฟอสเฟตมากกว่าไอออนประจุบวก 1 วาเลนซี่



ภาพที่ 1 การเกาะยึดฟอสเฟตไอออนบนพื้นผิวอนุภาคออกไซด์ของโลหะ (M = อะตอมศูนย์กลาง อาจเป็น Al, Fe ที่พื้นผิวอนุภาคออกไซด์ของโลหะ; OH, OH2 = ligand)
(ก) การเข้าแทนที่โมเลกุลของน้ำ
(ข) การเข้าแทนที่ไฮดรอกซิลไอออน

ที่มา : เพิ่มพูน (2542)

2.3 การจัดการดินเพื่อเพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดินกรดจัด

ดินกรด เป็นดินที่มีค่าความเป็นกรดเป็นด่างต่ำกว่า 7 มีไฮโดรเจนไอออนในสารละลายดินอยู่ในปริมาณมาก ซึ่งเรียกว่า กรดจริง (active acidity) ส่วนไฮโดรเจนไอออนที่ถูกดูดยึดที่ผิวอนุภาคดินเรียกว่า กรดแฝง (potential acidity) ดินกรดโดยทั่วไปจะเป็นดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ การเจริญเติบโตของพืชมักถูกจำกัดโดยความเป็นพิษของอะลูมินั่ม แมงกานีส และเหล็ก อีกทั้งยังส่งผลให้ดินขาดธาตุฟอสฟอรัส แคลเซียม แมกนีเซียม และโมลิบดินั่ม (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

การเกิดดินกรด โดยเฉพาะดินในเขตร้อนที่ผ่านการผุพังสลายตัวมาเป็นเวลานาน จะทำให้ประจุบวกที่เป็นด่าง (Base cation) ที่ดูดซับอยู่ใต้ผิวอนุภาคดินเหนียว ถูกชะล้างโดยน้ำฝนที่ตกลงมาและไหลซึมผ่านดินไป ทั้งนี้ขณะที่น้ำฝนไหลผ่านดินจะละลายเอาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งมีอยู่จำนวนมากในดิน เกิดเป็นกรดคาร์บอนิค ซึ่งจะแตกตัวให้ไฮโดรเจนไอออนทำให้น้ำที่ไหลผ่านดินมีปฏิกิริยาเป็นกรด และขณะที่ไฮโดรเจนไอออนไหลผ่านลงดินก็จะไล่ที่ประจุที่เป็นด่างที่ดูดยึดอยู่ที่ผิวอนุภาคดินให้สูญหายไปด้วย และไฮโดรเจนไอออนก็จะดูดยึดที่ผิวอนุภาคแทนและเมื่อผ่านระยะเวลาที่นาน ในที่สุดผิวของอนุภาคดินจะมีไฮโดรเจนไอออนมากกว่าประจุที่เป็นด่าง จึงทำให้ดินนั้นมีปฏิกิริยาเป็นกรด นอกจากนี้ยังมีกระบวนการอื่นๆ ที่ทำให้ดินเป็นกรด เช่น ซากเน่าเปื่อยผุพังของอินทรียวัตถุในดิน ซึ่งจะก่อให้เกิดกรดไนตริกและกรดซัลฟิวริก (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548) การออกซิไดซ์ปุ๋ยแอมโมเนียโดยจุลินทรีย์เป็นไนเตรทอิออนและไฮโดรเจนอิออน การเกิดขบวนการไฮโดรไลซีส (hydrolysis) ของเฟอริกอิออน และอะลูมินั่มอิออน เป็นต้น ปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อความรุนแรงของความเป็นกรดของดิน ขึ้นอยู่กับธรรมชาติ และปริมาณของปัจจัยเหล่านี้ รวมทั้งความมากน้อยของกระบวนการแลกเปลี่ยนและการดูดซับไอออนในดิน (เจริญ และคณะ, 2540) การใช้ประโยชน์ที่ดินที่มีสภาพเป็นกรด จะมีข้อจำกัดต่อการเจริญเติบโตของพืช 2 ปัจจัย คือ การขาดธาตุอาหาร ได้แก่ การขาดธาตุฟอสฟอรัสและแคลเซียม และการที่มีธาตุอาหารบางชนิดอยู่ในระดับสูงจนเป็นพิษต่อพืช เช่น อะลูมินั่ม โดยเมื่ออะลูมินั่มละลายออกมาในสารละลายดินในปริมาณมากเกินไป พืชจะเกิดอาการรากกุด หยาบและสั้น รากไม่มีพัฒนาการ พืชไม่มีขนรากอ่อนและรากจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเข้ม เป็นต้น (กรมพัฒนาที่ดิน, 2532)

สำหรับดินที่มีสภาพเป็นกรดจัด เป็นดินที่มีความเป็นกรดสูงมาก โดยมีค่าความเป็นกรดเป็นด่างระหว่าง 4.6-5.5 (กรมพัฒนาที่ดิน, 2558) การจัดการดินกรดจัดเพื่อการผลิตพืช ประกอบด้วยการปรับปรุงสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของดิน เช่น การลดระดับความเป็นกรดของดิน โดยการใส่ปูนเพื่อปรับสภาพความเป็นกรดของดินอย่างมีประสิทธิภาพและไม่เป็นอันตรายต่อพืช ควรใส่ปูนตามปริมาณที่แนะนำหรือใส่เพียงครึ่งหนึ่งในปีแรกและที่เหลือใส่อีกครั้งในปีต่อไป และควรปล่อยให้ปูนทำปฏิกิริยากับดินสักระยะหนึ่งก่อนปลูกพืช (ศิราณี และบัญชา, 2557) การเพิ่มปริมาณอินทรียวัตถุในดินโดยวัสดุอินทรีย์ เช่น ปุ๋ยหมักที่ใส่ในดินกรดจัดจะเป็นการเพิ่มแหล่งอาหารของจุลินทรีย์ส่งผลให้ปริมาณและกิจกรรมจุลินทรีย์เพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนธาตุอาหารในดิน รวมถึงกิจกรรมจุลินทรีย์ พวกไมคอร์ไรซาที่บริเวณรากพืช ช่วยเพิ่มธาตุอาหาร (สรสิทธิ์, 2535) การเลือกชนิดพันธุ์พืชที่ทนต่อความเป็นกรด การเพิ่มธาตุอาหารพืชในดินให้เพียงพอและมีประสิทธิภาพ การจัดการหน้าดินให้เหมาะสมเพื่อลดการชะล้างพังทลาย

และรักษาความชื้นในดิน และการปรับสภาวะแวดล้อมของดินรอบๆ รากพืชชั้นไถพรวนให้เหมาะสม (ศิราณี และบัญชา, 2557)

อย่างไรก็ตามการจัดการดินกรดจัดต้องมีการผสมผสานระหว่างวิธีการต่างๆ ตามลักษณะของดิน ภูมิประเทศ ภูมิอากาศ และชนิดของพืชพรรณที่นำมาปลูก ซึ่งจากการศึกษาของ Turan *et al.* (2006) พบว่าการใส่ปุ๋ยเคมีฟอสฟอรัสเพื่อเพิ่มปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินที่มีสภาพเป็นกรดจัด ฟอสฟอรัสที่ใส่ลงไปกว่า 75-90 เปอร์เซ็นต์ จะเกิดการตกตะกอนกับเหล็กและอะลูมินั่มในดิน ทำให้พืชไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ ในขณะที่การจัดการโดยการใช้ปุ๋ยเคมีฟอสฟอรัสร่วมกับวัสดุปรับปรุงดินชนิดอื่นๆ เช่น ปุ๋ยหมัก ปุ๋ยพืชสด และวัสดุปูน เป็นต้น สามารถเพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดินและเพิ่มผลผลิตพืชได้ โดยนริศ (2551) ได้ศึกษาอิทธิพลของการใส่ปูนร่วมกับปุ๋ยเคมีฟอสฟอรัสต่อการเจริญเติบโตของข้าวโพดหวานในดินกรดจัด พบว่าการใส่ปูนร่วมกับปุ๋ยเคมีฟอสฟอรัสมีปฏิสัมพันธ์ทางบวกกับค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดิน โดยค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดินที่เพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินเพิ่มขึ้นตามไปด้วย นิรันดร์ และวันชัย (2555) พบว่าการปรับปรุงดินกรดจัดด้วยปุ๋ยหมักร่วมกับการใส่ปูนตามค่าความต้องการปูนของดิน ทำให้ข้าวโพดมีผลผลิตสูงกว่าการปรับปรุงดินกรดโดยการใช้ปุ๋ยหมักเพียงอย่างเดียวถึง 10 เปอร์เซ็นต์ และบรรเจิดลักษณ์ และคณะ (2553) ได้ศึกษาการจัดการดินกรดจัด (pH 4.6) เพื่อการผลิตข้าว พบว่าการใช้พืชปุ๋ยสด อัตรา 2 ตันต่อไร่ ร่วมกับปุ๋ยเคมีฟอสฟอรัสตามค่าวิเคราะห์ดิน สามารถเพิ่มผลผลิตข้าวไรซ์เบอร์รี่ได้สูงกว่าการใส่ปูนตามค่าวิเคราะห์ดินร่วมกับปุ๋ยเคมีฟอสฟอรัสตามค่าวิเคราะห์ดิน โดยให้ผลผลิต 655 และ 593 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ และทำให้ได้ผลตอบแทนทางเศรษฐกิจสูงสุดคือ 12,747 บาทต่อไร่ ขณะที่การใส่ปูนตามค่าความต้องการปูนร่วมกับปุ๋ยเคมีฟอสฟอรัสตามค่าวิเคราะห์ดินให้ผลตอบแทนทางเศรษฐกิจเท่ากับ 10,785 บาทต่อไร่ (ตารางที่ 1) แสดงให้เห็นว่าการใช้วัสดุปูนเพื่อปรับสภาพดิน นอกจากให้ผลผลิตข้าวที่ต่ำกว่าการใช้พืชปุ๋ยสด อัตรา 2 ตันต่อไร่ ร่วมกับปุ๋ยเคมีฟอสฟอรัสตามค่าวิเคราะห์ดิน ยังเป็นการเพิ่มต้นทุนการผลิต จึงทำให้ได้ผลตอบแทนทางเศรษฐกิจต่ำ โดยสรสิทธิ์ (2535) กล่าวว่าการใส่ปุ๋ยอินทรีย์จำพวกปุ๋ยหมัก ปุ๋ยพืชสดในดินที่มีสภาพเป็นกรด เป็นการเพิ่มแหล่งอาหารของจุลินทรีย์ดิน ทำให้มีปริมาณและกิจกรรมของจุลินทรีย์ดินเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนรูปธาตุอาหารพืชในดิน เช่น จุลินทรีย์พวกละลายอนินทรีย์ฟอสฟอรัสที่ถูกดูดยึดในดิน และจุลินทรีย์ไมคอร์ไรซา เป็นต้น

ตารางที่ 1 แสดงสมบัติทางเคมีของดิน ผลผลิตข้าว และผลตอบแทนทางเศรษฐกิจ

ตำรับการทดลอง	ความเป็นกรดเป็นด่าง	ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ผลผลิตข้าว (กิโลกรัมต่อไร่)	ผลตอบแทนทางเศรษฐกิจ (บาทต่อไร่)
สมบัติดินก่อนทดลอง	4.5	5.0	-	-
1. ควบคุม	4.67	3.00	504.00bc	5,294
2. ปลูกข้าวสินเหล็ก	4.90	3.67	244.00d	4,000
3. ปลูกข้าวไรซ์เบอรี่	4.97	2.67	464.00c	9,195
4. พืชปุ๋ยสด 2 ตัน/ไร่ + ปลูกข้าวสินเหล็ก	5.13	2.67	214.00d	3,383
5. พืชปุ๋ยสด 2 ตัน/ไร่ + ปลูกข้าวไรซ์เบอรี่	4.83	3.00	655.00a	12,747
6. ปรับดินตาม LR + ปลูกข้าวสินเหล็ก	5.27	3.67	333.00d	4,778
7. ปรับดินตาม LR + ปลูกข้าวไรซ์เบอรี่	5.90	3.67	593.00ab	10,785
8. ปรับดินตาม LR พืชปุ๋ยสด 2 ตัน/ไร่ + ปลูกข้าวสินเหล็ก	6.00	3.67	261.00d	4,153
9. ปรับดินตาม LR พืชปุ๋ยสด 2 ตัน/ไร่ + ปลูกข้าวไรซ์เบอรี่	5.67	3.33	527.00bc	9,156
F-test	-	-	**	-
C.V. (%)	-	-	12.9	-

ที่มา : ดัดแปลงจาก บรรเจิดลักษณ์ และคณะ (2553)

2.4 จุลินทรีย์ละลายอนินทรีย์ฟอสเฟต

2.4.1 ชนิดของจุลินทรีย์ละลายอนินทรีย์ฟอสเฟต ปัจจุบันหลายประเทศทั่วโลกมีการประยุกต์ใช้ประโยชน์จุลินทรีย์ดินที่มีประสิทธิภาพในการละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตเป็นปุ๋ยชีวภาพ เพื่อเพิ่มผลผลิตพืช โดยกลุ่มจุลินทรีย์ละลายอนินทรีย์ฟอสเฟต (Phosphate Solubilizing Microorganism: PSM) เป็นจุลินทรีย์ดินที่มีความสามารถในการละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตที่อยู่ในรูปสารประกอบอนินทรีย์ฟอสเฟตที่ไม่ละลายน้ำ ให้อยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้และเป็นประโยชน์แก่พืช จุลินทรีย์เหล่านี้มีหลายชนิดทั้งที่เป็นแบคทีเรียและเชื้อรา เช่น *Aspergillus* sp., *Penicillium* sp., *Pseudomonas* sp., *Azospirillum* sp., *Bacillus* sp., *Rhizobium* sp., *Burkholderia* sp., *Arthrobacter* sp., *Alcaligenes* sp., *Serratia* sp., *Enterobacter* sp., *Acinetobacter* sp., *Flavobacterium* sp. และ *Erwinia* sp. เป็นต้น (Illmer and schinner, 1992; Panhwar *et al*., 2012; Karpagam and Nagalakshmi, 2014) (ตารางที่ 2) จุลินทรีย์เหล่านี้สามารถพบได้ทั่วไปในดินพื้นที่เกษตรกรรม พื้นที่ป่าไม้ และพื้นที่ทั่วไป โดยเฉพาะดินบริเวณรากพืช (อาภารัตน์, 2549) แต่ชนิดและปริมาณของจุลินทรีย์ขึ้นอยู่กับชนิดของดินและการใช้ประโยชน์ที่ดิน (ธงชัย, 2546) นอกจากนี้ยังมีจุลินทรีย์ในกลุ่มแอ็คติโนมัยซีส (actinomycetes) เช่น *actinomyces* sp., *Streptomyces* sp. จุลินทรีย์กลุ่มไซยาโนแบคทีเรีย (cyanobacteria) เช่น *Anabena* sp., *Calithrix braunii* sp., *Nostoc* sp., *Scytonema* sp. และ จุลินทรีย์ในกลุ่ม Arbuscular mycorrhiza (VAM) เช่น *Glomus fasciculatum* เป็นต้น (Sharma *et al.,* 2013) ที่สามารถละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตในดินได้

ตารางที่ 2 ชนิดของจุลินทรีย์ละลายอินทรีย์ฟอสเฟตในดิน

จุลินทรีในกลุ่มแบคทีเรียที่ละลายอินทรีย์ฟอสเฟต	จุลินทรีในกลุ่มราที่ละลายอินทรีย์ฟอสเฟต
Achromobacter	**Aspergillus**
Bacillus	*- A. awamori*
- B. subtilis	*- A. carbonum*
- B. cereus	*- A. flavas*
- B. circulans	*- A. niger*
- B. megaterium Var. phosphaticum	*- A. terreus*
- B. mycoides	*- A. tubingensis*
- B. polymyxa	**Cladosporium**
- B. pulvifaciens	**Curvularia**
Escherichia	*- C. lunata*
- E. freundii	**Cylindrocladium**
Flavobacterium	**Fusarium**
Micrococcus	*- F. oxysporum*
Pseudomonas	**Micromonospora**
- P. fiuorescens	**Paeclomyces**
- P. putida	**Penicillium**
- P. rathonis	*- P. digitatum*
- P. striata	*- P. pinophilum*
Serratia	*- P. rubrum*
- S. phosphaticum	**Pythium**
Thiobacillus	**Rhizopus**
- T. thiooxidans	**Schwanniomyces**
- T. thioparus	*- S. occidentalis*
	Sclerotium
	- S. rolfsii
	Trichoderma

ที่มา : อาภารัตน์ (2549)

2.4.2 กลไกการละลายอนินทรีย์ฟอสเฟต กลไกการละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตของจุลินทรีย์เกิดจากกระบวนการผลิตกรดอินทรีย์ของจุลินทรีย์ เช่น กรดกลูโคนิค (gluconic) กรดไกลโคลิก (glycolic acid) กรดฟูมาริค (fumaric) กรดซัคซินิค (succinic) กรดอะซีติค (acetic) กรดออกซาลิค (oxalic) กรดฟอร์มิก (formic acid) กรดลูตามิก (glutamic acid) กรดไกลออกซาลิก (glyoxalic acid) กรดแอลฟา-คีโตบิวทิริก (α- ketobutyric acid) กรดแลกติก (lactic acid) กรดมาลิอิก (maleic acid) กรดมาลิก (Malic acid) กรดทาร์ทาริก (Tartaric acid) และกรดซิตริค (Citric) เป็นต้น (อาภารัตน์, 2549; Rodriguez and Fraga, 1999; Panhwar *et al*., 2011; Surapat *et al*., 2013; Rashid *et al.,* 2004) โดยกรดอินทรีย์เหล่านี้จะทำให้เกิดกระบวนการคีเลชั่น (chelation) และปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนประจุ ทำให้สารประกอบอนินทรีย์ฟอสเฟตที่ถูกดูดยึดในดิน ละลายสู่สารละลายดินและเป็นประโยชน์ต่อพืช (Poonguzhali *et al*., 2008; Khan *et al*., 2009; Sharma *et al*., 2013) ธงชัย (2546) กล่าวว่า ส่วนใหญ่จุลินทรีย์กลุ่มเฮทเทอโรโทรพ (heterotroph) จะปลดปล่อยกรดอินทรีย์ออกมาจำนวนหนึ่งเสมอ ระหว่างการย่อยสลายสารอินทรีย์ แต่จะมีความแตกต่างกันทั้งชนิดและปริมาณของกรดอินทรีย์ จากการศึกษาของ Illmer and schinner (1992) พบว่า ระหว่างการละลายสารประกอบอนินทรีย์ฟอสเฟตของจุลินทรีย์ *Penicillium* sp. และ *Pseudomonas* sp. มีการปลดปล่อยกรดไกลโคลิกและกรดกลูโคนิก ซึ่งกรดเหล่านี้มีส่วนในการละลายฟอสเฟตในดินอีกทั้งกรดอินทรีย์บางชนิดยังทำปฏิกิริยาคีเลชั่นกับแคลเซียมและเหล็ก ทำให้มีอนินทรีย์ฟอสเฟตในสารละลายดินมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าจุลินทรีย์ *Nitrobacter* sp. และ *Thiobacillus* sp. สามารถสร้างและปลดปล่อยกรดไนตริค (nitric acid) และกรดซัลฟูริค (sunfulic acid) ซึ่งกรดเหล่านี้ช่วยลดความเป็นด่างของดิน ทำให้เกิดการละลายฟอสเฟตในดินด่างมากขึ้น สอดคล้องกับ Illmer and schinner (1995) ซึ่งศึกษาการละลายอะลูมินั่มฟอสเฟตของจุลินทรีย์ 4 สายพันธุ์ คือ *Aspergillus niger, Penicillium simplicissimum, Pseudomonas* sp. และ *Penicillium aurantiogriseum* พบว่า จุลินทรีย์ทั้ง 4 สายพันธุ์ มีความสามารถในการละลายอะลูมินั่มฟอสเฟตได้ดี โดยเชื้อรา *Aspergillus niger* มีการผลิตกรดซิตริค ออกซาลิค และกลูโคนิคระหว่างการเจริญเติบโต

2.4.3 การคัดเลือกจุลินทรีย์ละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตเพื่อผลิตปุ๋ยชีวภาพ จุลินทรีย์ละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตสามารถพบได้ทั่วไปในดิน โดยเฉพาะดินในบริเวณรากพืช แต่จะมีความแตกต่างกันทั้งชนิด ปริมาณ และประสิทธิภาพ โดยปริมาณของจุลินทรีย์ละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตจะได้รับอิทธิพลจากชนิดของดินและการเขตกรรมที่แตกต่างกัน (ธงชัย, 2546) สอดคล้องกับ Zaidi *et al*. (2009) กล่าวว่าจุลินทรีย์ละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตสามารถพบได้ทั่วไปในดิน แต่จะแตกต่างกันที่ความหนาแน่นและประสิทธิภาพการละลายอนินทรีย์ฟอสเฟต โดยประชากรของจุลินทรีย์ในกลุ่มแบคทีเรียมีประมาณ 1-50 เปอร์เซ็นต์ของประชากรจุลินทรีย์ทั้งหมด ขณะที่จุลินทรีย์ในกลุ่มรามีประมาณ 0.1-0.5 เปอร์เซ็นต์ของประชากรจุลินทรีย์ทั้งหมด โดยทั่วไปจะคัดเลือกจุลินทรีย์จากดินบริเวณรากพืช ดินนอกบริเวณรากพืช พื้นที่ที่มีหินฟอสเฟต และพื้นที่ดินมีปัญหา โดยใช้วิธี Serial plate dilution method หรือวิธี enrichment cuture technique

Pikovskaya (1948) เป็นบุคคลแรกที่พบว่าจุลินทรีย์ดินสามารถละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตในรูปที่พืชใช้ประโยชน์ได้ช้ามาก ให้เป็นประโยชน์แก่พืชได้ ซึ่งเป็นต้นแบบของวิธีการแยกเชื้อและสูตรอาหารในการเลี้ยงจุลินทรีย์ละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตที่ชื่อ พิโคสคายา (Pikovskaya's media) หลังจากนั้นได้มีการพัฒนาวิธีการและอาหารเลี้ยงจุลินทรีย์ละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตหลายสูตร เช่น Bromophenol Blue dye method และ National Botanical Research Institute P (NBRIP) medium (Gupta *et al*., 1994) เป็นต้น

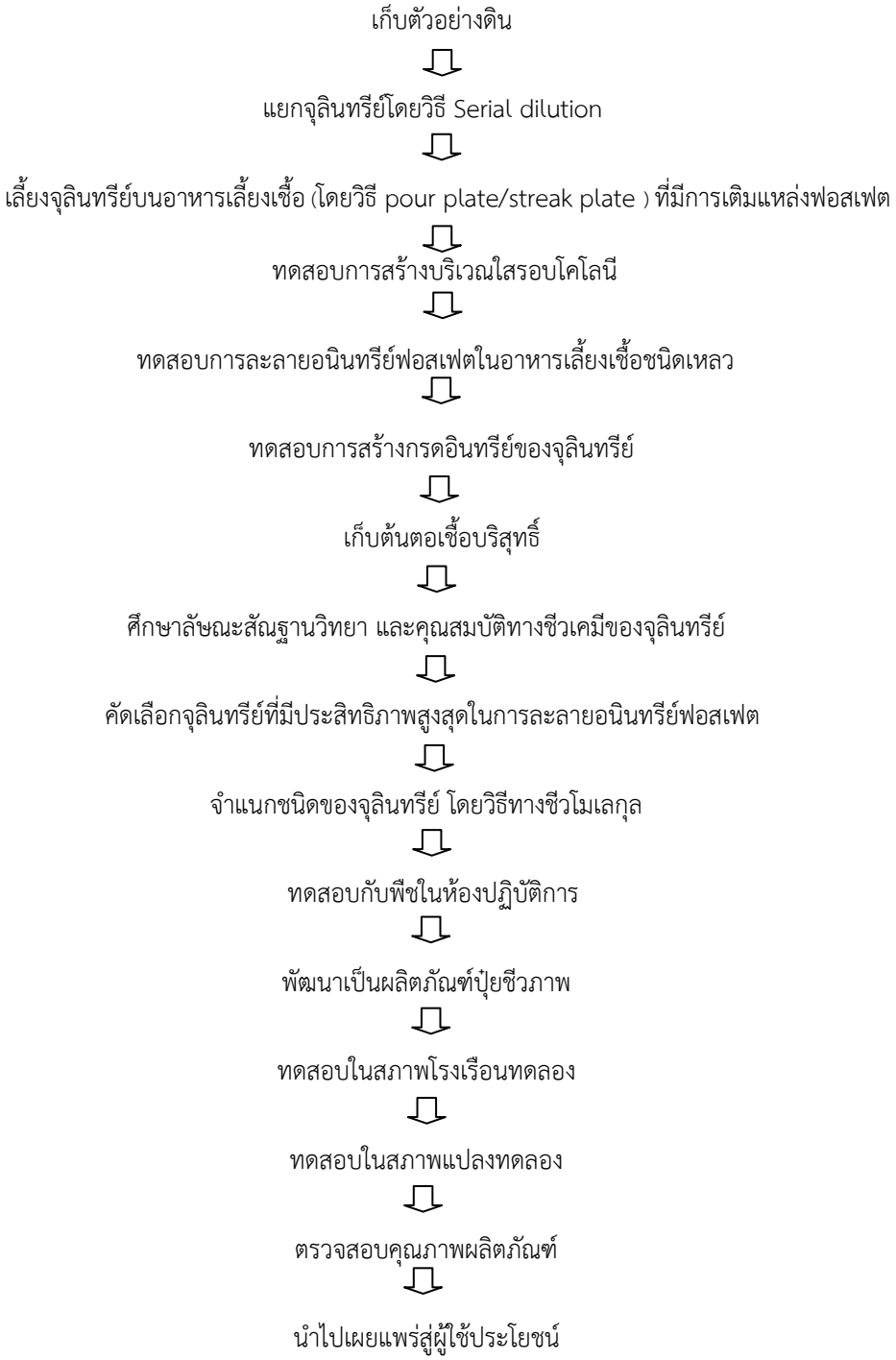
สำหรับแหล่งฟอสเฟตในอาหารเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ละลายอนินทรีย์ฟอสเฟต โดยส่วนใหญ่ใช้ไตรแคลเซียมฟอสเฟต (tricalcium phosphate ; TCP) นอกจากนี้ยังมีการใช้เหล็กฟอสเฟต (iron phosphate) อะลูมินั่มฟอสเฟต (aluminum phosphate) และแคลเซียมฟอสเฟต (calcium phosphate) แต่จะละลายน้ำได้ยากกว่าไตรแคลเซียมฟอสเฟต โดยในการทดสอบกิจกรรมจะเริ่มด้วยการทดสอบการสร้างบริเวณใสรอบโคโลนีบนอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดแข็งถ้าตัวอย่างจุลินทรีย์ที่ทดสอบมีการสร้างบริเวณใสรอบโคโลนี แสดงว่ามีประสิทธิภาพในการละลายอนินทรีย์ฟอสเฟต หลังจากนั้นคัดเลือกจุลินทรีย์ที่มีการสร้างบริเวณใสรอบโคโลนีที่กว้าง เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตในอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดเหลวที่มีการเติมสารประกอบอนินทรีย์ฟอสเฟตในรูปที่ไม่ละลายน้ำ โดยจะคัดเลือกจุลินทรีย์ที่มีการเจริญเติบโตและการละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตและปลดปล่อยฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์สูงสุด เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในสภาพโรงเรือนทดลอง สภาพแปลงทดลอง และพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ปุ๋ยชีวภาพ (Bashan *et al*., 2013)

จากรายงานการศึกษา พบว่าจุลินทรีย์ละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตแต่ละชนิดจะมีประสิทธิภาพการละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของจุลินทรีย์และรูปของอนินทรีย์ฟอสเฟตในดิน จากการศึกษาของ Illmer and schinner (1992) พบว่าเชื้อรา *Penicillium* sp. และเชื้อแบคทีเรีย *Pseudomonas* sp. ที่คัดแยกจากดินป่ามีประสิทธิภาพสูงใกล้เคียงกัน ในการละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตในอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดเหลวที่มีส่วนผสมของไฮดรอกไซด์อะพาไทด์ (hydroxyl apatite) และแคลเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟตดีไฮเดรท (calcium hydrogen phosphate dehydrate) เมื่อนำจุลินทรีย์ทั้ง 2 สายพันธุ์ มาทดสอบการละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตในดินที่มีการเติมหินฟอสเฟตเป็นแหล่งฟอสฟอรัส พบว่าเชื้อรา *Penicillium* sp. มีประสิทธิภาพการละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตสูงกว่าเชื้อแบคทีเรีย *Pseudomonas* sp. สอดคล้องกับ Goenadi *et al*. (2000) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของเชื้อราละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตที่คัดเลือกจากดินป่าเขตร้อนในประเทศอินโดนีเซีย จำนวน 36 สายพันธุ์ ในอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดเหลวที่มีโมร็อคแคนฟอสเฟต (moroccan phosphate) เป็นส่วนประกอบ พบว่าเชื้อรา *Penicillium* sp. และ *Aspergillus* sp. มีประสิทธิภาพสูงสุดในการละลายอนินทรีย์ฟอสเฟต โดยเชื้อรา *Aspergillus* sp. มีแนวโน้มมีประสิทธิภาพสูงกว่าเชื้อรา *Penicillium* sp. สอดคล้องกับ Nahas *et al*. (1990) ได้ศึกษาเชื้อราละลายแร่ฟลูออะพาไทต์ (fluorapatite) พบว่าเชื้อรา *Aspergillus niger* มีประสิทธิภาพในการละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตสูงสุด

แต่จากการศึกษาของ Stephen and Jisha (2011) ได้คัดเลือกจุลินทรีย์ละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตจากดินบริเวณรากพริกไทยดำ ข้าว กล้วย ถั่วพุ่ม สับปะรด และยางพารา สามารถคัดเลือกจุลินทรีย์ละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตได้ 17 ไอโซเลต โดยมีประสิทธิภาพการ

ละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตอยู่ในช่วง 11.38 - 68.80 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยแบคทีเรีย PSB73 มีประสิทธิภาพสูงสุดในการละลายอนินทรีย์ฟอสเฟต เมื่อจำแนกจุลินทรีย์ พบว่าจัดอยู่ในกลุ่มแบคทีเรีย *Burkholderia gladioli* สอดคล้องกับ Song *et al*. (2008) พบว่าแบคทีเรีย *Burkholderia cepacia* ที่คัดแยกมาจากดินบริเวณจังหวัดกิมแฮ ประเทศเกาหลี สามารถละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตในอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดเหลวที่มีการเติมไตรแคลเซียมฟอสเฟต 0.5 เปอร์เซ็นต์ ได้ถึง 345.9 มิลลิกรัมต่อลิตร สอดคล้องกับ Kailasan and Vamanrao (2015) พบว่าจุลินทรีย์ *Burkholderia tropica* และ *Burkholderia cepacia* สามารถละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตในอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดเหลวพิโคสคายา 400 และ 375 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และยังสามารถผลิตสารเสริมการเจริญเติบโตของพืช เอนไซม์ฟอสฟาเตส และสารไซเดอร์โรฟอร์ที่ช่วยให้พืชมีความต้านทานโรคได้ โดย Pandey *et al*. (2008) กล่าวว่าจุลินทรีย์ในกลุ่ม *Burkholderia* sp. สามารถใช้เป็นปุ๋ยชีวภาพเพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดิน ช่วยลดการใช้ปุ๋ยเคมี และมลพิษต่างจากการใช้ปุ๋ยเคมีอย่างต่อเนื่องได้

การพัฒนาจุลินทรีย์ละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตเป็นผลิตภัณฑ์ปุ๋ยชีวภาพ ต้องมีการวิจัยพัฒนาในห้องปฏิบัติการถึงคุณสมบัติและประสิทธิภาพของจุลินทรีย์ และสภาพแวดล้อมที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ เช่น ความเค็มของดิน ความเป็นกรดเป็นด่างของดิน ความชื้นดิน อุณหภูมิดิน และสภาพภูมิอากาศ ซึ่งประสิทธิภาพการละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตของจุลินทรีย์จะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของดิน (Rodriguez and Fraga, 1999) ดังนั้นจึงต้องคัดเลือกจุลินทรีย์ที่มีคุณสมบัติที่สอดคล้องกับพื้นที่ที่จะนำจุลินทรีย์ไปใช้ประโยชน์ ซึ่งขั้นตอนการคัดเลือกจุลินทรีย์ละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตในดินเพื่อผลิตปุ๋ยชีวภาพดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 แสดงขั้นตอนการคัดเลือกและทดสอบประสิทธิภาพจุลินทรีย์ละลายอนินทรีย์ฟอสเฟต

ที่มา : Sharma *et al.* (2013)

บทที่ 3

ผลการศึกษา

3.1 การแยกจุลินทรีย์ละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตซุปเปอร์ พด.9

ดำเนินการเก็บตัวอย่างดินในพื้นที่การเกษตร และพื้นที่ป่าไม้จากจังหวัดต่างๆ ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ได้แก่ จังหวัดขอนแก่น ชัยภูมิ นครราชสีมา มหาสารคาม และบุรีรัมย์ ภาคเหนือ ได้แก่ จังหวัดลำปาง และจังหวัดตาก และภาคกลาง ได้แก่ จังหวัดนครนายก ปทุมธานี สระบุรี และเพชรบุรี รวมจำนวนทั้งหมด 78 ตัวอย่าง เพื่อใช้เป็นตัวแทนในการแยกเชื้อแบคทีเรียละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตในอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดแข็งพิโคสคายา ซึ่งมีแคลเซียมฟอสเฟตเป็นแหล่งฟอสฟอรัส ผลการแยกเชื้อแบคทีเรียละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตทั้งหมดจำนวน 116 ไอโซเลท (ตารางที่ 3)

ตารางที่ 3 สถานที่เก็บตัวอย่าง และจำนวนแบคทีเรียละลายอนินทรีย์ฟอสเฟต

สถานที่เก็บตัวอย่าง	จำนวนแบคทีเรียละลายฟอสเฟต (ไอโซเลท)
ขอนแก่น	15
ชัยภูมิ	10
นครราชสีมา	15
มหาสารคาม	10
บุรีรัมย์	10
ลำปาง	13
ตาก	12
นครนายก	11
เพชรบุรี	11
สระบุรี	9
รวม	**116**

3.2 การคัดเลือกแบคทีเรียละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตซุปเปอร์ พด.9

3.2.1 ทดสอบการสร้างบริเวณใสรอบโคโลนี

นำเชื้อแบคทีเรียที่แยกได้ทั้งหมดจำนวน 116 ไอโซเลต มาเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียบนอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดแข็งพิโคสคายา โดยการแตะลงบนอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดแข็ง เพื่อวัดความกว้างของบริเวณใสรอบโคโลนีเป็นเวลา 6 วัน พบว่าสามารถแบ่งระดับความกว้างของบริเวณใสรอบโคโลนีได้ 4 ระดับ (ตารางที่ 4) โดยมีแบคทีเรียที่มีระดับความกว้างของบริเวณใสรอบโคโลนีสูงสุด คือ มากกว่า 3 มิลลิเมตร จำนวน 20 ไอโซเลต แบคทีเรียที่มีระดับความกว้างของบริเวณใสรอบโคโลนี 2-3 มิลลิเมตร จำนวน 25 ไอโซเลต แบคทีเรียที่มีระดับความกว้างของบริเวณใสรอบโคโลนี 1-2 มิลลิเมตร จำนวน 11 ไอโซเลต และน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร จำนวน 60 ไอโซเลต โดยบริเวณใสรอบโคโลนีดังกล่าวเกิดจากจุลินทรีย์ละลายองค์ประกอบของแคลเซียมฟอสเฟตที่มีลักษณะเป็นตะกอนสีขาวขุ่นในอาหารเลี้ยงเชื้อ ซึ่งแคลเซียมฟอสเฟตเป็นฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปที่จุลินทรีย์รวมทั้งพืชไม่สามารถ

นำไปใช้ประโยชน์ได้ ดังนั้นจุลินทรีย์จะต้องละลายฟอสฟอรัสในรูปดังกล่าวก่อน โดยการผลิตกรดอินทรีย์ ได้แก่ กรดออกซาลิก (oxalic acid) กรดซิตริก (citric) กรดแลคติก (lactic) เป็นต้น (Gyaneshwar *et al*., 2002) ถ้าจุลินทรีย์มีการสร้างบริเวณใสรอบโคโลนีกว้างมากแสดงว่าจุลินทรีย์มีแนวโน้มมีประสิทธิภาพในการละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตได้สูง

ตารางที่ 4 ระดับความกว้างของบริเวณใสรอบโคโลนี

ระดับความกว้างบริเวณใส (มิลลิเมตร)	จำนวนจุลินทรีย์ละลายฟอสเฟต (ไอโซเลท)
มากกว่า 3	20
2-3	25
1-1.9	11
น้อยกว่า 1	60
รวม	**116**

3.2.2 ทดสอบประสิทธิภาพการละลายแคลเซียมฟอสเฟต

คัดเลือกแบคทีเรียที่มีการสร้างบริเวณใสรอบโคโลนีมากกว่า 3 มิลลิเมตร จากผลการทดลองข้อ 3.2.1 จำนวน 20 ไอโซเลท นำมาเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อพิโคสคายาชนิดเหลว บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส นาน 2 วัน เก็บตัวอย่างทุกๆ 12 ชั่วโมง คือ ชั่วโมงที่ 0 12 24 36 48 และ 60 ครั้งละ 20 มิลลิลิตร เพื่อวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ โดยนำตัวอย่างที่เก็บมาปั่นให้ตกตะกอนที่ความเร็ว 10,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10-15 นาที แล้วนำตัวอย่างที่ปั่นตกตะกอนแล้วมาวิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟต โดยวิธี Bray II พบว่าปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ที่เกิดจากกิจกรรมของจุลินทรีย์เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการทดสอบ โดยส่วนใหญ่มีการปลดปล่อยปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์สูงสุดที่ 24 ชั่วโมง มีบางไอโซเลตที่ปลดปล่อยสูงสุดที่ 36 และ 48 ชั่วโมง (ตารางที่ 5 และ 6) โดยได้คัดเลือกเชื้อแบคทีเรียจำนวน 4 ไอโซเลท คือแบคทีเรียรหัส 30 47 68 และ 110 ซึ่งมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์สูงสุดที่ 24 และ 48 ชั่วโมง คือ 575.75, 874.29, 874.00 และ 826.44 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

ตารางที่ 5 ประสิทธิภาพการละลายแคลเซียมฟอสเฟตในอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดเหลว

ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	จำนวนจุลินทรีย์ (ไอโซเลท)
0-100	3
101-500	13
มากกว่า 500	4
รวม	**20**

ตารางที่ 6 ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์จากการละลายแคลเซียมฟอสเฟต

รหัสเชื้อ	ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)					
	0 ชั่วโมง	12 ชั่วโมง	24 ชั่วโมง	36 ชั่วโมง	48 ชั่วโมง	60 ชั่วโมง
7	2.47	159.95	230.14	156.44	258.20	184.40
9	2.47	190.64	300.53	183.20	195.77	172.75
10	2.36	210.05	386.45	295.70	620.34	140.59
20	1.80	62.62	124.21	73.24	224.86	219.53
25	1.64	40.14	45.85	33.76	187.30	239.48
26	2.83	273.43	206.77	90.15	208.37	209.86
30	2.50	299.79	512.39	403.43	575.75	133.01
47	2.55	456.05	874.29	425.07	224.01	51.25
55	2.07	154.71	254.77	101.34	226.65	208.09
56	2.30	291.65	302.21	288.36	338.64	186.97
68	2.55	209.42	874.00	454.47	19.60	74.84
107	2.47	101.89	371.20	33.14	19.30	126.54
108	2.47	195.63	484.73	203.55	56.10	123.34
109	2.36	132.38	623.31	215.36	125.89	147.97
110	2.50	189.69	826.44	363.38	139.10	341.02
111	-	-	4.01	491.37	13.35	15.01
112	1.64	141.99	73.95	301.81	90.03	12.04
113	2.83	57.35	333.51	129.12	43.20	283.17
115	2.07	206.13	410.92	465.43	104.60	93.48
116	2.30	167.93	487.44	604.81	85.10	20.00

3.2.3 ทดสอบประสิทธิภาพการละลายเหล็กและอะลูมินั่มฟอสเฟต

นำแบคทีเรียทั้ง 4 ไอโซเลท ที่มีกิจกรรมการละลายแคลเซียมฟอสเฟตสูงสุดใน ข้อ 3.2.2 มาเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดเหลวพิโคสคายา ที่มีการเติมเหล็กและอะลูมินั่มฟอสเฟตและปรับค่าความเป็นกรดเป็นด่างด้วยกรดไฮโดรคลอริค (HCl) 1 N 4 ระดับ คือ 3.5 4.5 5.5 และ 6.0 บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส นาน 2 วัน เก็บตัวอย่างทุกๆ 3 วัน เป็นเวลา 6 วัน โดยในอาหารที่มีการเติมเหล็กฟอสเฟต พบว่าจุลินทรีย์ทั้ง 4 ไอโซเลต สามารถเจริญเติบโตและละลายเหล็กฟอสเฟตได้ดีทุกระดับความเป็นกรดเป็นด่าง โดยแบคทีเรียรหัส 68 สามารถละลายเหล็กฟอสเฟตได้สูงสุดที่ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง 5.5 เท่ากับ 22.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ 3 วันหลังบ่มเชื้อ รองลงมา คือ แบคทีเรียรหัส 110 สามารถละลายเหล็กฟอสเฟตได้สูงสุดที่ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง 3.5 เท่ากับ 19.40 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ 3 วันหลังบ่มเชื้อ (ตารางที่ 7) สำหรับอาหารที่มีการเติมอะลูมินั่มฟอสเฟต พบว่าจุลินทรีย์ทั้ง 4 ไอโซเลต สามารถเจริญเติบโตและละลายอะลูมินั่มฟอสเฟตได้ดีทุกระดับความเป็นกรดเป็นด่าง เช่นเดียวกันแบคทีเรียรหัส 68 สามารถละลายอะลูมินั่มฟอสเฟตได้สูงสุดที่ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง 4.5 เท่ากับ 20.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ 3 วันหลังบ่มเชื้อ รองลงมา คือ แบคทีเรียรหัส 110 สามารถละลายอะลูมินั่มฟอสเฟตได้สูงสุดที่ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง 5.5 เท่ากับ 19.20 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ 3 วันหลังบ่มเชื้อ (ตารางที่ 8)

ตารางที่ 7 ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์จากการละลายเหล็กฟอสเฟต

รหัสเชื้อ	3 วัน				6 วัน			
	pH 3.5	pH 4.5	pH 5.5	pH 6.0	pH 3.5	pH 4.5	pH 5.5	pH 6.0
30	14.40	18.80	18.60	19.00	10.90	15.60	16.30	13.70
47	18.30	17.20	17.10	17.30	16.20	15.60	15.00	15.00
68	19.90	20.60	22.00	21.36	16.50	17.30	17.60	17.00
110	19.40	18.10	18.60	16.36	15.40	15.90	16.00	16.00

ตารางที่ 8 ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์จากการละลายอลูมินั่มฟอสเฟต

รหัสเชื้อ	เลี้ยงเชื้อ 3 วัน				เลี้ยงเชื้อ 6 วัน			
	pH 3.5	pH 4.5	pH 5.5	pH 6.0	pH 3.5	pH 4.5	pH 5.5	pH 6.0
30	18.80	17.30	17.90	16.10	16.10	16.10	16.30	16.30
47	18.20	19.10	16.20	14.50	16.30	15.90	16.10	14.90
68	19.50	20.50	19.80	16.50	16.80	16.80	16.00	16.20
110	19.10	18.90	19.20	15.60	16.30	16.30	16.00	16.00

3.2.4 ศึกษาการเจริญเติบโตและการจำแนกจุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9

1) ทดสอบระดับความเป็นกรดเป็นด่างต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย คัดเลือกแบคทีเรียละลายอนินทรีย์ฟอสเฟต 2 ไอโซเลท ที่มีกิจกรรมการละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตสูงจากการทดสอบในข้อ 3.2.3 คือ เชื้อแบคทีเรียรหัส 68 และ 110 โดยนำเชื้อมาเลี้ยงในอาหารที่มีการเหล็กและอะลูมินั่มฟอสเฟตที่ระดับความเป็นกรดเป็นด่าง 4 ระดับ 3.5 4.5 5.5 และ 6.0 บ่มเชื้อจุลินทรีย์เป็นเวลา 20 ชั่วโมง พบว่าในอาหารที่มีการเติมเหล็กฟอสเฟต แบคทีเรียทั้ง 2 ไอโซเลต สามารถเจริญเติบโตได้ทั้ง 4 ระดับความเป็นกรดเป็นด่าง โดยแบคทีเรียรหัส 68 ที่ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง 3.5-6.0 มีปริมาณเชื้ออยู่ในช่วง 2.2×10^{8} - 3.00×10^{11} โคโลนีต่อมิลลิลิตร โดยมีปริมาณสูงสุดที่ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง 4.5-6.0 มีปริมาณเชื้อเท่ากับ 3.00×10^{11} โคโลนีต่อมิลลิลิตร แบคทีเรียรหัส 110 ที่ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง 3.5-6.0 มีปริมาณแบคทีเรียอยู่ระหว่าง 3.10×10^{7}-6.16×10^{11} โคโลนีต่อมิลลิลิตร มีปริมาณเชื้อสูงสุดที่ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง 5.5 เท่ากับ 6.16×10^{11} โคโลนีต่อมิลลิลิตร ในอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีการเติมอะลูมินั่มฟอสเฟต พบว่าแบคทีเรียทั้ง 2 ไอโซเลท สามารถเจริญเติบโตได้ทั้ง 4 ระดับความเป็นกรดเป็นด่าง โดยแบคทีเรียรหัส 68 มีปริมาณเชื้อเท่ากับ 3.00×10^{11} โคโลนีต่อมิลลิลิตร แบคทีเรียรหัส 110 ที่ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง 3.5-6.0 มีปริมาณแบคทีเรียอยู่ระหว่าง 3.00×10^{11}- 3.14×10^{11} โคโลนีต่อมิลลิลิตร มีปริมาณเชื้อสูงสุดที่ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง 6.0 เท่ากับ 3.14×10^{11} โคโลนีต่อมิลลิลิตร (ตารางที่ 9)

ห้องสมุดกรมพัฒนาที่ดิน

ตารางที่ 9 ปริมาณจุลินทรีย์ละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตในอาหารเลี้ยงเชื้อที่เติมเหล็กและอะลูมินั่มฟอสเฟตที่ 4 ระดับความเป็นกรดเป็นด่าง

รหัส	อาหารเหล็กฟอสเฟต (โคโลนีต่อมิลลิลิตร)				อาหารอลูมินั่มฟอสเฟต (โคโลนีต่อมิลลิลิตร)			
	pH 3.5	pH 4.5	pH 5.5	pH 6.0	pH 3.5	pH 4.5	pH 5.5	pH 6.0
68	2.20×10^{8}	3.00×10^{11}	3.00×10^{11}	3.00×10^{11}	3.00×10^{11}	3.00×10^{11}	3.00×10^{11}	3.00×10^{11}
110	1.18×10^{11}	1.48×10^{11}	6.16×10^{11}	3.00×10^{7}	3.00×10^{11}	3.00×10^{11}	3.00×10^{11}	3.14×10^{11}

2) การจำแนกและทดสอบความเป็นพิษของจุลินทรีย์

จากผลการคัดเลือกจุลินทรีย์ละลายอนินทรีย์ฟอสเฟต สามารถคัดเลือกแบคทีเรียรหัส 68 และ แบคทีเรียรหัส 110 มีประสิทธิภาพสูงสุดในการละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตและการเจริญเติบโตที่ทุกระดับความเป็นกรดเป็นด่างของอาหารเลี้ยงเชื้อ เมื่อนำจุลินทรีย์ทั้ง 2 ไอโซเลท ไปวิเคราะห์ลำดับเบสเพื่อจัดจำแนก พบว่าแบคทีเรียรหัส 68 คือ *Burkholderia fungorum* และรหัส 110 คือ *Burkholderia cenocepacia* แต่เนื่องจากแบคทีเรีย *Burkholderia cenocepacia* (รหัส 110) เมื่อนำไปตรวจสอบความเป็นอัตรายต่อคน สัตว์ และพืช ที่กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ พบว่าเป็นแบคทีเรียที่อาจก่อโรคในคนและสัตว์ได้ จึงได้คัดเลือกแบคทีเรีย *Burkholderia fungorum* (รหัส 68) เพียงสายพันธุ์เดียวเพื่อพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์จุลินทรีย์ละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตซุปเปอร์ พด.9

3.2.5 การขยายเพื่อเพิ่มปริมาณจุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9

นำจุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9 ในรูปของหัวเชื้อแห้งมาขยายเพื่อเพิ่มปริมาณจากการศึกษาการขยายเพื่อเพิ่มปริมาณแบคทีเรีย *Burkholderia fungorum* (รหัส 68) โดยการขยายเพื่อเพิ่มปริมาณในปุ๋ยหมัก อัตรา 300 กิโลกรัม ร่วมกับรำข้าว 3 กิโลกรัม และจุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9 จำนวน 100 กรัม ปรับความชื้นด้วยน้ำให้ได้ประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ และตั้งกองปุ๋ยเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า บ่มไว้ในที่ร่ม พบว่าแบคทีเรีย *Burkholderia fungorum* (รหัส 68) สามารถเจริญเติบโตและเพิ่มปริมาณได้ตามระยะเวลาการบ่มเชื้อ มีปริมาณจุลินทรีย์อยู่ระหว่าง 1.83×10^{9} - 7.10×10^{9} โคโลนีต่อกรัม และสูงสุดที่ 5 วันหลังบ่ม คือ 7.10×10^{9} โคโลนีต่อกรัม (ตารางที่ 10)

ตารางที่ 10 ปริมาณจุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9 ที่ขยายเพื่อเพิ่มปริมาณในปุ๋ยหมัก

ตำรับทดลอง	ปริมาณแบคทีเรีย *Burkholderia fungorum* (โคโลนีต่อกรัม)					
	0 วัน	1 วัน	2 วัน	3 วัน	4 วัน	5 วัน
1. ปุ๋ยหมัก 100 กก.+รำข้าว 1 กก.	3.00×10^{5}	4.44×10^{7}	5.85×10^{6}	2.00×10^{8}	5.60×10^{9}	2.57×10^{9}
2. ปุ๋ยหมัก 200 กก.+รำข้าว 2 กก.	3.00×10^{5}	9.10×10^{7}	1.57×10^{7}	2.81×10^{7}	8.19×10^{6}	1.81×10^{7}
3. ปุ๋ยหมัก 300กก.+รำข้าว 3 กก.	3.00×10^{5}	2.10×10^{7}	5.55×10^{7}	2.31×10^{9}	1.83×10^{9}	7.10×10^{9}

ห้องสมุดกรมพัฒนาที่ดิน

3.3 ประโยชน์การใช้จุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9

ประโยชน์ของจุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9 ผลิตภัณฑ์จุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9 เป็นหัวเชื้อจุลินทรีย์ชนิดแห้ง จุลินทรีย์ในผลิตภัณฑ์จะอยู่ในสภาพพักตัวมีอัตราการเจริญเติบโตช้า ดังนั้นก่อนนำไปใช้ประโยชน์ต้องมีการขยายเชื้อเพื่อเพิ่มปริมาณจุลินทรีย์ก่อนที่จะนำไปใช้ประโยชน์ โดยนำจุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9 มาขยายเพื่อเพิ่มปริมาณในปุ๋ยหมัก 300 กิโลกรัม รำข้าวละเอียด 3 กิโลกรัม จุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9 จำนวน 1 ซอง (100 กรัม) ปรับความชื้นด้วยน้ำให้ได้ประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ และตั้งกองปุ๋ยเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า บ่มไว้ในที่ร่มเป็นเวลา 4 วัน จะมีปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ประมาณ 10^8 โคโลนีต่อกรัม (นวลจันทร์ และคณะ, 2553) สำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ จุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9 สามารถนำไปใช้ในพื้นที่ที่มีความเป็นกรดเป็นด่างตั้งแต่ 4.5-6.0 สำหรับข้าว พืชไร่ พืชผัก ไม้ดอกไม้ประดับ ใช้อัตรา 100 กิโลกรัมต่อไร่ หว่านให้ทั่วแปลง หรือใส่ระหว่างแถวก่อนปลูกพืช ไม้ผล ไม้ยืนต้น ใช้อัตรา 3 กิโลกรัมต่อต้น ในช่วงเตรียมหลุมปลูกโดยใส่รองก้นหลุมก่อนปลูกพืชและในช่วงเจริญเติบโตของพืช ใส่รอบทรงพุ่มในช่วงการบำรุงรักษาต้น (กรมพัฒนาที่ดิน, 2554) จากผลการทดสอบประสิทธิภาพจุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9 ต่อการเพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดินและผลผลิตพืช พบว่าจุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9 มีประสิทธิภาพ ดังนี้

1) ช่วยเพิ่มการเจริญเติบโตและผลผลิตพืช โดยการใช้จุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9 อัตรา 100 กิโลกรัมต่อไร่ ในกลุ่มชุดดินที่ 40 ที่มีค่าความเป็นกรดเล็กน้อย 6.2 มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์อยู่ในระดับปานกลางเท่ากับ 13.67 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สามารถเพิ่มความสูง และการแตกกอได้มากกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีตามค่าวิเคราะห์ดิน โดยข้าวมีความสูง เท่ากับ 12.98 และ 113.60 เซนติเมตร ตามลำดับ มีการแตกกอ เท่ากับ 11.30 และ 10.43 ต้นต่อกอ และให้ผลผลิตข้าวสูงกว่าการใช้ปุ๋ยเคมีตามค่าวิเคราะห์ดิน คือ 320.00 และ 219.00 กิโลกรัมต่อไร่ (กัญญาพร และคณะ, 2555)

2) ช่วยลดปริมาณการใช้ปุ๋ยเคมีฟอสฟอรัส โดยการใช้จุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9 อัตรา 100 กิโลกรัมต่อไร่ ในกลุ่มชุดดินที่ 22 ที่มีค่าความเป็นกรดจัด 4.8 ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์อยู่ในระดับต่ำ 3.00 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สามารถทำให้ข้าวมีผลผลิตใกล้เคียงกับการใส่ปุ๋ยเคมีฟอสฟอรัสตามค่าวิเคราะห์ดินคือ 400.00 และ 413.00 กิโลกกรัมต่อไร่ ตามลำดับ (ทองคำ, 2555) ยุทธสงค์ และคณะ (2555) พบว่าการใช้จุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9 อัตรา 400 กิโลกรัมต่อไร่ ในกลุ่มชุดดินที่ 40 ที่มีค่าความเป็นกรดจัด 5.4 ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์อยู่ในระดับต่ำ เท่ากับ 7.00 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สามารถเพิ่มผลผลิตมันสำปะหลังได้ 3,936 กิโลกรัมต่อไร่ สูงกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีฟอสฟอรัสตามค่าวิเคราะห์ดิน ให้ผลผลิตมันสำปะหลัง 3,623 กิโลกรัมต่อไร่ สอดคล้องกับสาคร (2555) พบว่าการใช้จุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9 อัตรา 150 กิโลกรัมต่อไร่ ในกลุ่มชุดดินที่ 40 ที่มีค่าความเป็นกรดจัด 4.9 มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์อยู่ในระดับต่ำ เท่ากับ 5.00 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สามารถเพิ่มผลผลิตหอมแดงได้สูงกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีฟอสฟอรัสตามค่าวิเคราะห์ดินคือ 2,819.30 และ 1,659.80 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ และให้ผลตอบแทนทางเศรษฐกิจสูงกว่าการใช้ปุ๋ยเคมีฟอสฟอรัสคือ 26,061 และ 9,274 บาทต่อไร่ ตามลำดับ

3) ช่วยเพิ่มการละลายหินฟอสเฟต โดยการใช้จุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9 อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ ร่วมกับหินฟอสเฟต อัตรา 100 กิโลกรัมต่อไร่ ในกลุ่มชุดดินที่ 40 ที่มีค่าความเป็นกรดปานกลาง 6.62 ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์อยู่ในระดับต่ำ 9.00 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สามารถเพิ่มผลผลิตข้าวโพดหวานได้ 4,267 กิโลกรัมต่อไร่ สูงกว่าการใส่หินฟอสเฟตเพียงอย่างเดียว ให้ผลผลิต 3,627 กิโลกรัมต่อไร่ (นวลจันทร์, 2555)

4) ช่วยลดปริมาณการใช้วัสดุปูนในการปรับปรุงดิน โดยการใช้จุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9 อัตรา 100 กิโลกรัมต่อไร่ ในกลุ่มชุดดินที่ 10 ที่มีสภาพเป็นกรดจัด 4.67 มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์อยู่ในระดับปานกลาง 10.33 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สามารถเพิ่มผลผลิตข้าวได้ใกล้เคียงกับการใช้ปูนตามค่าความต้องการปูนร่วมกับปุ๋ยเคมีฟอสฟอรัสตามค่าวิเคราะห์ดิน คือ 419.00 และ 501.00 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ แต่การใช้จุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9 ให้ผลตอบแทนทางเศรษฐกิจสูงกว่าการใช้ปูนตามค่าความต้องการปูนร่วมกับปุ๋ยเคมีฟอสฟอรัสตามค่าวิเคราะห์ดินคือ 1,698.00 และ 1,123.20 บาทต่อไร่ ตามลำดับ (นิสุดา, 2555) สอดคล้องกับพิลาสลักษณ์ (2555) พบว่าการใช้จุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9 อัตรา 150 กิโลกรัมต่อไร่ สามารถเพิ่มผลผลิตกระเจี๊ยบเขียว ในกลุ่มชุดดินที่ 40 ที่มีค่าความเป็นกรดเล็กน้อย 5.7 ได้สูงสุดคือ 4,175.61 กิโลกรัมต่อไร่ สูงกว่าการใช้ปูนตามค่าความต้องการปูนร่วมกับปุ๋ยเคมีฟอสฟอรัส ได้ผลผลิต 2,110.70 กิโลกรัมต่อไร่ และให้ผลตอบแทนทางเศรษฐกิจสูงกว่าการใช้ปูนร่วมกับปุ๋ยเคมีฟอสฟอรัสคือ 60,096 และ 26,526 บาทต่อไร่ ตามลำดับ ประสิทธิ์ (2555) พบว่าการใช้จุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9 ในดินเปรี้ยวกลุ่มชุดดินที่ 11 ที่มีสภาพเป็นกรดรุนแรง 3.5 มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์อยู่ในระดับปานกลาง 22.00 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ต้องมีการจัดการดินอื่นๆ ร่วมด้วย โดยมีการยกระดับความเป็นกรดเป็นด่างของดินจากกรดรุนแรง 3.5 เป็นกรดจัด 5.5 ร่วมกับการใช้จุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9 อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ พบว่าสามารถเพิ่มผลผลิตกระเจี๊ยบเขียวได้ 1,456.48 กิโลกกรัมต่อไร่ สูงกว่าการใส่ปูนตามค่าความต้องการปูนร่วมกับการใช้ปุ๋ยเคมีฟอสฟอรัสตามค่าวิเคราะห์ดิน ซึ่งให้ผลผลิตเท่ากับ 1,223.75 กิโลกรัมต่อไร่

3.4 ข้อจำกัดการใช้จุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9

การใช้จุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9 จากข้อมูลผลการวิจัยข้างต้นแสดงให้เห็นว่าจุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9 มีประสิทธิภาพในการละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตและช่วยเพิ่มผลผลิตพืชได้ใกล้เคียงกับการใส่ปุ๋ยเคมีฟอสฟอรัส และการใช้ปูนปรับสภาพดิน และที่สำคัญทำให้ได้ผลตอบแทนทางเศรษฐกิจสูงกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีฟอสฟอรัสและการใช้ปูนปรับ สภาพดินแต่อย่างไรก็ตามการใช้จุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9 ยังมีข้อจำกัดในการใช้ประโยชน์ ดังนี้

1) ในดินที่มีปริมาณฟอสฟอรัสต่ำ ควรมีการเพิ่มแหล่งฟอสฟอรัสให้แก่ดิน เช่น หินฟอสเฟต ซึ่งจุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9 สามารถช่วยเพิ่มการละลายของหินฟอสเฟตได้ โดยจากการศึกษาของนวลจันทร์ (2555) พบว่าการใช้จุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9 อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ ร่วมกับหินฟอสเฟต อัตรา 100 กิโลกรัมต่อไร่ สามารถเพิ่มผลผลิตข้าวโพดหวานได้สูงกว่าการใส่หินฟอสเฟตเพียงอย่างเดียว

2) ในดินที่มีความเป็นกรดรุนแรงมาก โดยเฉพาะดินเปรี้ยวจัด ต้องมีการจัดการดินอื่นๆ ร่วมด้วย เช่น การใช้วัสดุปูนเพื่อยกระดับความเป็นกรดเป็นด่างของดิน เพื่อให้จุลินทรีย์มีกิจกรรมได้

อย่างสมบูรณ์มากขึ้น จากผลการวิจัยของประสิทธิ์ (2555) พบว่าการยกระดับความเป็นกรดเป็นด่างของดินเปรี้ยวจัดด้วยปูนจากสภาพความเป็นกรดรุนแรง คือ 3.5 เป็นสภาพกรดจัด คือ 5.5 ร่วมกับการใช้จุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9 อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ สามารถเพิ่มผลผลิตกระเจี๊ยบเขียวได้สูงกว่าการใส่ปูนตามค่าความต้องการปูนร่วมกับปุ๋ยเคมีฟอสฟอรัสตามค่าวิเคราะห์ดิน และยังสามารถลดปริมาณการใช้ปูนและต้นทุนการผลิตได้ด้วย

3) เนื่องจากจุลินทรีย์ในกลุ่มละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตส่วนใหญ่เป็นจุลินทรีย์ในกลุ่มเฮสเทอร์โรโทรป ซึ่งจำเป็นต้องใช้สารอินทรีย์เป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงานในการดำเนินกิจกรรม ดังนั้นดินที่มีอินทรียวัตถุต่ำการใช้จุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9 อาจไม่เห็นผล จึงต้องเพิ่มปุ๋ยอินทรีย์ในดินร่วมกับการใช้จุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9 เช่น การไถกลบตอซังพืชหลังเก็บเกี่ยวผลผลิต การปลูกพืชปุ๋ยสดและสับกลบลงในดิน และการใช้ปุ๋ยคอกปุ๋ยหมัก เป็นต้น โดย Zhen *et al*. (2014) ได้เปรียบเทียบการใช้ปุ๋ยเคมีไนโตรเจน และปุ๋ยหมักมูลสัตว์ ในการปลูกข้าวโพด พบว่าการใช้ปุ๋ยหมักมูลสัตว์สามารถเพิ่มปริมาณจุลินทรีย์ดินทั้งกิจกรรมการสร้างเอนไซม์ ปริมาณและความหลากหลายของสายพันธุ์จุลินทรีย์ สูงกว่าการใช้ปุ๋ยเคมีไนโตรเจนเพียงอย่างเดียว โดยเฉพาะการใช้ปุ๋ยหมักมูลสัตว์ร่วมกับการใช้ปุ๋ยชีวภาพ

3.5 การใช้แบคทีเรียในกลุ่ม *Burkholderia* sp. เพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดินและผลผลิตพืช

จากรายงานการวิจัยหลายฉบับระบุว่าแบคทีเรีย *Burkholderia* sp. มีประสิทธิภาพสูงในการละลายอนินทรีย์ฟอสเฟต โดยสามารถพบ *Burkholderia* sp. ทั้งในเซลล์ราก บริเวณผิวราก และบริเวณรอบรากพืช โดยมีความโดดเด่นทั้งปริมาณและประสิทธิภาพการละลาย อนินทรีย์ฟอสเฟตในบริเวณรากพืชหลายชนิด เช่น อ้อย ข้าว และข้าวโพด เป็นต้น (Rodriguez and Fraga, 1999; Han *et al*., 2009; Luvizotto *et al*., 2010; Perin *et al.,* 2006; Singh *et al*., 2011) ซึ่งในการนี้ผลิตภัณฑ์จุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9 ของกรมพัฒนาที่ดิน เป็นผลจากการวิจัยและพัฒนาจนได้แบคทีเรียที่มีประสิทธิภาพสูงในการละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตทั้งในดินกรดเล็กน้อย กรดปานกลาง กรดจัด และดินเปรี้ยวจัด และเป็นแบคทีเรียในกลุ่ม *Burkholderia* sp. คือ *Burkholderia fungorum*

Burkholderia sp. เป็นจุลินทรีย์กลุ่มเฮสเทอร์โรจีเนียส (heterogeneous group) มีระบบเมตาบอลิซึมแบบ versatility มีอยู่กว่า 30 สปีชีส์ โดยส่วนใหญ่จะอาศัยอยู่ในบริเวณรากพืช มีบทบาทสำคัญต่อการส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช เช่น การตรึงไนโตรเจน การละลายอนินทรีย์ฟอสเฟต และผลิตสารเสริมการเจริญเติบโต เป็นต้น (Compant *et al*., 2005; Estrada-de *et al*., 2001; Shaharoona *et al*., 2007) จากการศึกษาของ Munusamy *et al*. (2008) ได้จัดจำแนกจุลินทรีย์สกุล *Burkholderia* sp. ในนาข้าว (*Oryza sativa* L.) พบว่า จุลินทรีย์กลุ่ม *Burkholderia* sp. เป็นจีนัสที่มีความหลากหลายของต้นกำเนิด มีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมได้ดี ส่วนใหญ่พบได้ในบริเวณรอบรากพืช โดยได้คัดเลือกจุลินทรีย์ 3 ไอโซเลต คือ CBMB40 CBPB-HIM และ CBPB-HOD เมื่อจำแนกด้วยวิธีทางชีวเคมีและชีวโมเลกุล พบว่าจุลินทรีย์ทั้ง 3 ไอโซเลต คือ *Burkholderia vietnamiensis, Burkholderia ubonensis* และ *Burkholderia pyrrocinia* ตามลำดับ และจากการศึกษาคุณสมบัติ พบว่า แบคทีเรียทั้ง 3 ไอโซเลต สามารถละลายอนินทรีย์ฟอสเฟต ผลิตฮอร์โมนออกซิน และเอนไซม์ 1-aminocyclopropane-1-

carboxylate (ACC) deaminase ควบคุมโรคพืชจากเชื้อ *Eriwiniw* caratovora และสร้างสารไซเดอร์โรฟอร์ (Siderophores) เจริญเติบโตได้ที่ค่าความเป็นกรดเป็นด่างช่วง 5.5-8.5 (เหมาะสมคือ 6.5 และ 7.0) เจริญได้ในอาหารที่มีความเค็มของโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้น 1.5 เปอร์เซ็นต์

ปัจจุบันมีการนำจุลินทรีย์ละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตมาใช้ประโยชน์ทางการเกษตรกันอย่างกว้างขวาง เช่น ในรัสเซียมีการผลิตปุ๋ยชีวภาพจากจุลินทรีย์ละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตโดยใช้ชื่อสินค้าว่า ฟอสโฟแบคทีริน (Phosphobacterin) สามารถเพิ่มผลผลิตพืชได้ 5-10 เปอร์เซ็นต์ Asuming-Brempong (2014) ศึกษาการใช้แบคทีเรียละลายอนินทรีย์ฟอสฟอรัสร่วมกับปุ๋ยทริปเปิลซุปเปอร์ฟอสเฟต อัตรา 7.5 กิโลกรัมฟอสเฟตต่อไร่ พบว่าสามารถเพิ่มผลผลิตข้าวได้ 17 เปอร์เซ็นต์ และแบคทีเรียในกลุ่ม *Burkholderia* sp. มีการศึกษากันอย่างกว้างขวางเพื่อคัดเลือกสายพันธุ์ที่มีประสิทธิภาพสูงมาใช้ประโยชน์ในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ปุ๋ยชีวภาพ ดังนี้

ตารางที่ 11 ผลของแบคทีเรีย *Burkholderia cepacia* ต่อการเจริญเติบโตข้าวโพด

ตำรับทดลอง	ความยาว (ซม.)		น้ำหนักแห้ง (ต้น/กอ)		พื้นที่ใบ (ต.ร.ซม.)
	ต้น	ราก	ต้น	ราก	
1. Control	98.11b	16.35b	30.69bc	13.57bc	190.00bc
2. *Burkholderia cepacia*	115.42a	19.58a	34.16a	17.81a	242.50a
3. *Fusarium oxysporum*	92.93b	14.47b	29.27c	12.39c	184.00c
4. *Burkholderia cepacia* + *Fusarium oxysporum*	100.77b	16.94ab	31.99ab	14.97b	208.50b

ที่มา : Zhao *et al*. (2014)

3.5.1 ดินที่มีสภาพเป็นกลาง (Neutral soil) ดินที่เหมาะสมสำหรับการปลูกพืชมีค่าความเป็นกรดเป็นด่างระหว่าง 6.5-7.5 (กรมพัฒนาที่ดิน, 2558) การใช้ประโยชน์จุลินทรีย์ละลายอนินทรีย์สามารถใช้ได้ในดินทุกชนิด ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของจุลินทรีย์และแหล่งฟอสฟอรัสในดิน จากการศึกษาของ Zhao *et al.* (2014) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของประสิทธิภาพของแบคทีเรียละลาย อนินทรีย์ฟอสเฟตที่คัดเลือกจากดินบริเวณรากข้าวโพดในประเทศจีน จำนวน 12 ไอโซเลท พบว่าจุลินทรีย์ SCAUK0330 มีประสิทธิภาพสูงสุดในการละลายอนินทรีย์ฟอสเฟต คือ 45.3 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อนำมาจัดจำแนกพบว่าจัดเป็นแบคทีเรีย *Burkholderia cepacia* หลังจากนั้นนำมาทดสอบประสิทธิภาพต่อการเจริญเติบโตของข้าวโพดในสภาพโรงเรือนทดลอง ในดินที่มีสภาพเป็นกลาง 7.5 มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์อยู่ในระดับต่ำ 7.56 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม พบว่าการใส่แบคทีเรีย *Burkholderia cepacia* สามารถเพิ่มการเจริญเติบโตของข้าวโพดด้านความสูง ความยาวของราก น้ำหนักแห้งของต้นและราก และพื้นที่ใบ สูงกว่าตำรับที่ใส่จุลินทรีย์ *Fusarium oxysporum* และตำรับที่ไม่ใส่จุลินทรีย์ (ตารางที่ 11) สอดคล้องกับ Dar *et al*. (2014) ได้คัดเลือกจุลินทรีย์ละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตจากดินบริเวณรากอ้อย (*Saccharum officinarum*) ประเทศปากีสถาน จำนวน 16 ไอโซเลท เมื่อนำมาทดสอบการละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตในอาหาร

เลี้ยงเชื้อชนิดเหลวที่มีการเติมไตรแคลเซียมฟอสเฟต 1 เปอร์เซ็นต์ พบว่าจุลินทรีย์ CEMB-22 และ CEMB-15 มีประสิทธิภาพสูงสุดในการละลายอนินทรีย์ฟอสเฟต คือ 61.70 และ 59.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อจัดจำแนกเชื้อ พบว่าจัดเป็น *Klebsiella* sp. และ *Burkholderia* sp. ตามลำดับ เมื่อนำจุลินทรีย์ทั้ง 2 สายพันธุ์ มาทดสอบประสิทธิภาพต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตข้าวในแปลงทดลอง โดยดินมีค่าความเป็นกรดเป็นด่าง เท่ากับ 7.74 มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์อยู่ในระดับต่ำ 5.10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม พบว่าการใส่จุลินทรีย์ละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตทั้ง 2 สายพันธุ์ ทำให้ข้าวมีผลผลิตสูงกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีฟอสฟอรัสเพียงอย่างเดียว คือ 893.21, 891.00 และ 858.60 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ ขณะที่การใส่จุลินทรีย์ผสม 2 สายพันธุ์ ทำให้ข้าวมีผลผลิตสูงสุด คือ 935.84 กิโลกรัมต่อไร่ (ตารางที่ 12)

ตารางที่ 12 ผลของแบคทีเรียละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตข้าว

ตำรับทดลอง	ความสูง (ซม.)	การแตกกอ (ต้น/กอ)	ผลผลิต (กก./ไร่)
1. ควบคุม	100.67b	16.00c	858.60c
2. *Klebsiella* sp.	104.33a	20.00b	891.00b
3. *Burkholderia* sp.	104.00b	20.33b	893.21b
4. *Klebsiella* sp. + *Burkholderia* sp.	106.67a	23.66a	935.84a

ที่มา : ดัดแปลงจาก Dar *et al*. (2014)

3.5.2 ดินที่มีสภาพเป็นกรด (acid soil) คือ ดินที่มีค่าความเป็นกรดเป็นด่างต่ำกว่า 7.00 ส่วนใหญ่เป็นดินที่เกิดภายใต้สภาพที่มีการชะล้างรุนแรงและยาวนาน ทำให้ดินมีพัฒนาการสูง ธาตุประจุบวกที่เป็นด่างถูกชะล้างออกไป ดินจึงมีสภาพเป็นกรด ทำให้มีเหล็กและอะลูมินั่มละลายออกมามาก จนเป็นพิษต่อพืชและความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืชลดลงส่งผลถึงการเจริญเติบโตและผลผลิตพืช (ศิราณี และบัญชา, 2557) Linu *et. al*. (2009) ได้ศึกษาประสิทธิภาพการละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตของแบคทีเรีย *Gluconacetobacter* sp., *Burkholderia* sp., และ *Pseudomnas striata* ต่อการเจริญเติบโตของถั่วพุ่ม (*Vigna unguiculata* (L.) (Walp.)) ในดินร่วนที่มีค่าความเป็นกรดเล็กน้อยเท่ากับ 6.1 มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์อยู่ในระดับต่ำ 1.41 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม พบว่าทุกวิธีการที่ใส่จุลินทรีย์ละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตสามารถเพิ่มปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ได้สูงกว่าไม่ใส่จุลินทรีย์ โดยการใส่จุลินทรีย์ *Burkholderia* sp. และ *Pseudomnas striata* ทำให้มีฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์เท่ากัน คือ 3.40 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ขณะที่ไม่ใส่จุลินทรีย์มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ เท่ากับ 1.65 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อมีการจัดการร่วมกับหินฟอสเฟต พบว่าการใส่จุลินทรีย์ *Burkholderia* sp. และ *Pseudomnas striata* ยังคงมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ใกล้เคียงกัน คือ 4.15 และ 4.80 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ขณะที่การใส่หินฟอสเฟตเพียงอย่างเดียวมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ เท่ากับ 1.91 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และการใช้จุลินทรีย์ละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตทั้ง 2 สายพันธุ์ ยังทำให้ถั่วพุ่มมีน้ำหนักแห้งเมล็ดสูงกว่าไม่ใส่จุลินทรีย์อย่างชัดเจน คือ 31.50 32.60 และ 4.66 กรัมต่อต้น ตามลำดับ สอดคล้องกับ Stephen *et al.* (2015) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของจุลินทรีย์ละลายอนินทรีย์ฟอสเฟต *Gluconacetobacter* sp. และ *Burkholderia* sp. ต่อการเพิ่มการเจริญเติบโตของข้าวในสภาพโรงเรือนทดลอง โดยเก็บตัวอย่างดิน

จากแปลงเกษตรกรที่มีสภาพเป็นกรดจัด เท่ากับ 5.0 มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์อยู่ในระดับต่ำ 1.62 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทดสอบโดยวิธีแช่รากต้นกล้าข้าวด้วยสารละลายจุลินทรีย์ พบว่าการใส่จุลินทรีย์ *Gluconacetobacter* sp. และ *Burkholderia* sp. สามารถเพิ่มปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินได้สูงกว่าการไม่ใส่จุลินทรีย์ละลายอนินทรีย์ฟอสเฟต คือ 22.99 24.93 และ 10.28 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อมีการเติมหินฟอสเฟต พบว่าการใส่จุลินทรีย์ *Gluconacetobacter* sp. และ *Burkholderia* sp. สามารถเพิ่มปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินได้มากกว่าการไม่ใส่จุลินทรีย์ละลายอนินทรีย์ฟอสเฟต คือ 36.97 35.84 และ 30.28 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ขณะที่จุลินทรีย์ *Burkholderia* sp. มีประสิทธิภาพในการละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตสูงกว่า *Gluconacetobacter* sp. แต่การใส่จุลินทรีย์ผสม 2 สายพันธุ์ ร่วมกับการใส่หินฟอสเฟต พบว่ามีประสิทธิภาพในการเพิ่มปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินได้ใกล้เคียงกับการใส่ปุ๋ยเคมีซุปเปอร์ฟอสเฟต และทำให้ข้าวมีการแตกกอ และมีน้ำหนักเมล็ดต่อรวงมากกว่าการใช้ปุ๋ยเคมีซุปเปอร์ฟอสเฟต (ตารางที่ 13)

ตารางที่ 13 อิทธิพลของจุลินทรีย์ละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตต่อปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ การเจริญเติบโตและผลผลิตข้าว

ตำรับทดลอง	ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)	การแตกกอ (ต้น/กอ)	น้ำหนักเมล็ด (กรัม/รวง)
1. ควบคุม	10.28h	3.00d	0.79d
2. ปุ๋ยเคมีซุปเปอร์ฟอสเฟต (SP)	43.90a	8.25ab	1.03bc
3. หินฟอสเฟต (RP)	30.28d	7.25abc	1.00bc
4. *Gluconacetobacter* sp.	22.99g	5.00c	0.81d
5. *Burkholderia* sp.	24.93f	5.50c	0.95bcd
6. *Gluconacetobacter* sp. + *Burkholderia* sp.	26.39c	6.50bc	0.96bcd
7. *Gluconacetobacter* sp. + RP	35.84b	8.50ab	1.11b
8. *Burkholderia* sp. + RP	36.97b	8.50ab	1.12b
9. *Gluconacetobacter* sp. + *Burkholderia sp.* + RP	43.13a	9.50a	1.33a
CV (%)	0.97	3.55	0.09

ที่มา : ดัดแปลงจาก Stephen *et al.* (2015)

สอดคล้องกับ Surapat *et al.* (2013) ซึ่งได้ศึกษาประสิทธิภาพการละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตของจุลินทรีย์ที่คัดได้จากดินบริเวณรากพริกไทย 10 ไอโซเลท ในอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดเหลว พิโคสคายา ที่มีการเติมไตรแคลเซียมฟอสเฟต 0.5 เปอร์เซ็นต์ พบว่าจุลินทรีย์ทั้งหมด 10 ไอโซเลท สามารถละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตได้ระหว่าง 12.64-49.90 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยจุลินทรีย์รหัส KS04 มีประสิทธิภาพสูงสุด ในการละลายอนินทรีย์ฟอสเฟต คือ 49.90 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งหลังจากนำไปจัดจำแนกพบว่าจัดเป็นแบคทีเรีย *Burkholderia tropica* โดยมีการผลิตกรดอะซิตริค กรดซิตริค กรดกลูโคนิค กรดแลคติค กรดซัคซีนิค กรดโปรไพโอนิค และไม่ทราบชื่ออีก 2 ชนิด หลังจากนั้นนำแบคทีเรียทั้ง 10 ไอโซเลท มาทดสอบประสิทธิภาพในสภาพโรงเรือนทดลอง ในดินกรดจัด 4.6 มี

ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดในดิน เท่ากับ 66.8 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์อยู่ในระดับสูง 37.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม พบว่าแบคทีเรีย *Burkholderia tropica* (KS04) ทำให้พริกไทยมีความสูง เส้นผ่าศูนย์กลางลำต้น น้ำหนักสดของต้น น้ำหนักแห้งของต้น น้ำหนักสดของราก และน้ำหนักแห้งของราก การออกดอก และการดูดใช้ฟอสฟอรัสสูงที่สุด (ตาราง 14)

ตารางที่ 14 ผลของจุลินทรีย์ละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตต่อการเจริญเติบโต และการดูดใช้ฟอสฟอรัสของพริกไทย

ตำรับทดลอง	ส่วนลำต้นเหนือดิน				ราก		จำนวนดอก (ดอก/กระถาง)	การดูดใช้ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม/กระถาง)
	ความสูง (ซม.)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (ซม.)	น้ำหนักสด (กรัม/กระถาง	น้ำหนักแห้ง (กรัม/กระถาง)	น้ำหนักสด (กรัม/กระถาง)	น้ำหนักแห้ง (กรัม/กระถาง)		
1. ควบคุม	23.88a	0.26a	2.72a	0.38a	2.40ab	0.06a	1.00ab	0.002a
2. RA01	32.50b	0.30ab	5.18a	0.82a	2.02ab	0.28a	4.50cd	0.006abc
3. RA02	29.75b	0.26a	4.23a	0.65a	2.72bc	0.26a	0.00a	0.005ab
4. RA12	42.00b	0.32ab	8.45ab	1.39ab	2.00ab	0.53ab	1.50ab	0.014bc
5. RA28	29.50b	0.26a	4.57ab	0.58ab	2.27abc	0.54ab	3.00bc	0.006abc
6. RA32	43.00b	0.40b	9.17ab	1.52ab	1.61ab	0.61ab	1.50ab	0.011abc
7. HR06	33.50b	0.33ab	6.88ab	1.09ab	2.40abc	0.26a	2.75bc	0.006abc
8. HR07	42.50b	0.40b	10.81ab	1.70ab	1.76ab	0.70ab	4.25cd	0.017bc
9. KS01	41.50b	0.37ab	9.36ab	1.72ab	1.20a	0.54ab	1.50ab	0.017bc
10. KS04	49.00c	0.41b	14.50b	2.66b	3.25c	1.17b	5.50d	0.028d
11. PI01	39.00b	0.35ab	8.32ab	1.38ab	1.97ab	0.51ab	0.25a	0.015bc
CV (%)	35.7	26.5	73.4	91.3	92.8	84.9	190.28	84.85

ที่มา : Surapat *et al.,* (2013)

3.5.3 ดินเปรี้ยวจัด (Acid Sulfate Soil) เป็นดินที่เกิดจากตะกอนน้ำทะเลหรือตะกอนน้ำกร่อยที่มีสารประกอบของกำมะถันในรูปของแร่ไพไรท์ เมื่อถูกออกซิไดซ์จะให้สารประกอบสีเหลืองฟางข้าวเรียกว่า จาโรไซท์ (Jarosite) ซึ่งจะสะสมในชั้นหน้าตัดดิน ทำให้ดินมีความเป็นกรดสูง โดยมีค่าความเป็นกรดเป็นด่างอยู่ระหว่าง 3.0-4.5 เปนอุปสรรคตอการเจริญเติบโตของพืช ทำให้พืชเจริญเติบโตไดไมดี ดินมีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ ธาตุอาหารพืชบางชนิดไม่เป็นประโยชน์ต่อพืช โดยเฉพาะฟอสฟอรัส แต่อย่างไรก็ตามมีจุลินทรีย์บางสายพันธุ์ที่สามารถดำรงชีพอยู่ได้ในสภาวะดังกล่าว แต่ชนิดและปริมาณขึ้นอยู่กับชนิดของพืชและการจัดการดิน ซึ่งจุลินทรีย์ดินเหล่านี้มีบทบาทสำคัญต่อวัฏจักรธาตุอาหารพืช เช่น ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ และฟอสฟอรัส ช่วยเพิ่มความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืช โดยเฉพาะฟอสฟอรัสและลดความเป็นพิษของอะลูมินั่ม (Panhwar *et al.,* 2014) แบคทีเรียที่มีประสิทธิภาพสูงในการย่อยสลายอินทรีย์และละลายอนินทรีย์ฟอสฟอรัสในดินเปรี้ยวมีหลายสปีชีส์ เช่น *Pseudomonas* sp., *Bacillus* sp. และ *Rhizobium* sp. เป็นต้น (Takeuchi *et al.,* 2001) บัจจุบันมีรายงานว่าจุลินทรีย์ *Burkholderia* sp. หลายสายพันธุ์ สามารถอยู่ร่วมกับพืชทั้งในบริเวณรากและภายในรากพืชแบบอิงอาศัย ซึ่งนอกจากละลายอนินทรีย์ฟอสเฟต ตรึงไนโตรเจนแล้วยังสามารถควบคุมเชื้อสาเหตุโรคพืชบางชนิดได้ด้วย (Janssen, 2006) โดย Panhwar *et al.* (2014) คัดเลือกจุลินทรีย์ละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตจากพื้นที่ดินเปรี้ยวจัด เมืองกาลันตัน ประเทศมาเลเซีย ซึ่งมีค่าความเป็นกรดเป็นด่าง 3.3-4.7 โดยสามารถคัดเลือกจุลินทรีย์ได้ทั้งหมดจำนวน 21 ไอโซเลท และ

เมื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพการละลายอนินทรีย์ฟอสเฟต พบว่าจุลินทรีย์รหัส PSB7, PSB17 และ PSB21 มีประสิทธิภาพละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตสูงสุด คือ 145.00 142.00 และ 144.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และสามารถผลิตฮอร์โมนออกซินได้ 13.16 12.16 และ 14.96 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ หลังจากนั้นทดสอบประสิทธิภาพต่อการเจริญเติบโตของข้าว ในสภาพกรดจัด 4.7 พบว่าการใส่จุลินทรีย์ทั้ง 3 ไอโซเลท ทำให้ข้าวมีความยาวของรากข้าวมากกว่าการไม่ใส่จุลินทรีย์ คือ 57.6 58.02 58.51 และ 24.31 เซนติเมตร ตามลำดับ และเมื่อนำจุลินทรีย์ทั้ง 3 ไอโซเลท มาจัดจำแนก พบว่าจัดเป็นแบคทีเรีย *Burkholderia thailandensis, Sphingomona spituitosa* และ *Burkholderia seminalis* ตามลำดับ (ตารางที่ 15)

ตารางที่ 15 ผลของจุลินทรีย์ละลายอนินทรีย์ละลายฟอสเฟตต่อการเจริญเติบโตของข้าว

ตำรับทดลอง	ความสูง (ซม.)	น้ำหนักแห้ง (กรัม)	ความยาวราก (ซม.)
1. ควบคุม	14.5c	0.61c	24.31c
2. *Burkholderia thailandensis*	17.7b	0.71b	57.69b
3. *Burkholderia seminalis*	18.0a	0.76a	58.02a
4. *Sphangomonas pitutosa*	17.0b	0.71b	58.51a

ที่มา : Panhwar *et al.*, (2014)

สอดคล้องกับ Panhwar *et al.* (2015) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของจุลินทรีย์ปุ๋ยชีวภาพละลายอนินทรีย์ฟอสเฟต ซึ่งประกอบด้วย *Bacillus* sp., *Stenotrophomonas maltophila*, *Burkholderia thailandensis* และ *Burkholderia seminalis* ในดินเปรี้ยวที่มีค่าความเป็นกรดรุนแรง 3.80 มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์อยู่ในระดับปานกลาง 19.20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยเปรียบเทียบการใส่ปุ๋ยชีวภาพละลายอนินทรีย์ฟอสเฟต การใส่หินปูน และการใส่หินบะซอลต์ พบว่าการใส่ปุ๋ยชีวภาพละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตทำให้ดินมีค่าความเป็นกรดเป็นด่างสูงขึ้นใกล้เคียงกับการใช้หินปูน และหินบะซอลต์ คือ 4.17 4.55 และ 4.49 ตามลำดับ ขณะที่ตำรับควบคุมมีค่าความเป็นกรดเป็นด่าง เท่ากับ 3.91 (ตารางที่ 16) สำหรับผลผลิตข้าวพบว่าการใส่ปุ๋ยชีวภาพละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตข้าวมีผลผลิตสูงกว่าการใส่หินปูน และหินบะซอลต์ ให้ผลผลิตข้าวเท่ากับ 862.40 857.60 และ 555.20 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ ขณะที่การใส่ปุ๋ยชีวภาพละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตร่วมกับการใส่หินปูน ให้ผลผลิตข้าวสูงสุดคือ 1,091.20 กิโลกรัมต่อไร่ (ตารางที่ 14) นอกจากนี้ยังพบว่าปุ๋ยชีวภาพละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตสามารถลดความเป็นพิษของอะลูมินั่ม โดยการผลิตกรดอินทรีย์ทำให้เกิดการตกตะกอนของอะลูมินั่ม

ตารางที่ 16 ผลของปุ๋ยชีวภาพละลายอนินทรีย์ฟอสเฟต หินปูน และหินบะซอลต์ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดิน

ตำรับทดลอง	ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดิน				
	0 วัน	30 วัน	60 วัน	90 วัน	110 วัน
1. ควบคุม	3.8	3.56f	3.89d	3.95d	3.91d
2. ปุ๋ยชีวภาพ	3.8	4.11d	4.00c	4.14c	4.17c
3. หินปูน	3.8	4.90b	4.39a	4.53b	4.55ab
4. หินบะซอลต์	3.8	3.97e	4.10b	4.46b	4.49b
5. ปุ๋ยชีวภาพ + หินบะซอลต์	3.8	5.27a	4.50a	4.76a	4.79a
6. ปุ๋ยชีวภาพ + หินปูน	3.8	4.35c	4.20b	4.23c	4.32c

ที่มา : Panhwar *et al.*, (2015)

ตารางที่ 17 ผลของปุ๋ยชีวภาพละลายอนินทรีย์ฟอสเฟต หินปูน และหินบะซอลต์ ต่อการเจริญและผลผลิตข้าว

ตำรับทดลอง	ความยาวราก (ซม.)	การแตกกอ (ต้น/กอ)	น้ำหนัก 1000 เมล็ด (กรัม)	ผลผลิต (กก./ไร่)
1. ควบคุม	19.66d	9.00c	17.20d	468.80d
2. ปุ๋ยชีวภาพ	32.41a	20.00a	21.40c	862.40b
3. หินปูน	21.34b	19.00a	22.33b	857.60b
4. หินบะซอลต์	20.13c	16.00b	20.01c	555.20c
5. ปุ๋ยชีวภาพ + หินบะซอลต์	22.30b	19.00a	23.68a	852.80c
6. ปุ๋ยชีวภาพ + หินปูน	32.58a	21.00a	22.55b	1,091.20a

ที่มา : Panhwar *et al.*, (2015)

จากที่กล่าวมาข้างต้นแสดงให้เห็นว่าแบคทีเรียในกลุ่ม *Burkholderia* sp. เป็นกลุ่มจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพสูงในการละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตที่ถูกดูดยึดในดินให้เป็นประโยชน์แก่พืช และช่วยลดปริมาณการใช้ปุ๋ยเคมีฟอสฟอรัส และต้นทุนการผลิตพืช ซึ่งสามารถพบจุลินทรีย์กลุ่มดังกล่าวได้ทั่วไปในดิน โดยเฉพาะดินบริเวณรากพืช อีกทั้งยังสามารถพบในเซลล์ของรากพืชด้วย เป็นจุลินทรีย์ที่ทนต่อสภาพความเป็นกรดเป็นด่างของดินในช่วงกว้าง คือ 5.5-8.5

บทที่ 4

สรุปผลการศึกษา ข้อเสนอแนะ และประโยชน์ที่ได้รับ

4.1 สรุปผลการศึกษา

การคัดเลือกจุลินทรีย์ละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตซุปเปอร์ พด.9 จากการเก็บตัวอย่างดินจากภูมิภาคต่างๆของประเทศ จำนวนทั้งหมด 78 ตัวอย่าง สามารถแยกจุลินทรีย์ได้ทั้งหมด จำนวน 116 ไอโซเลท เมื่อนำจุลินทรีย์ทั้งหมดมาผ่านขั้นตอนการคัดเลือกและทดสอบประสิทธิภาพ สามารถคัดเลือกได้แบคทีเรียรหัส 68 โดยมีประสิทธิภาพการละลายแคลเซียมสูงสุด 826.44 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถละลายเหล็กฟอสเฟตได้ 22.00 มิลลิกรัมต่อลิตร และสามารถละลายอะลูมินั่มฟอสเฟตได้ 20.60 มิลลิกรัมต่อลิตร และสามารถเจริญเติบโตได้ดีในอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีค่าความเป็นกรดเป็นด่าง 3.5-6.0 มีปริมาณเชื้ออยู่ระหว่าง 2.2×10^{8} - 3.00×10^{11} โคโลนีต่อมิลลิลิตร เมื่อนำแบคทีเรียรหัส 68 ไปจัดจำแนกพบว่า คือ *Burkholderia fungorum*

ประโยชน์ของจุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9 การใช้ประโยชน์จุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9 ใช้ในรูปของจุลินทรีย์ที่ผ่านการขยายเชื้อเพื่อเพิ่มปริมาณในปุ๋ยหมัก ซึ่งจากการรวบรวมผลงานวิจัยพบว่าสามารถช่วยเพิ่มการเจริญเติบโตและผลผลิตพืช ลดปริมาณการใช้ปุ๋ยเคมีฟอสฟอรัส ลดปริมาณการใช้วัสดุปูนในการปรับปรุงดิน ช่วยเพิ่มการละลายของหินฟอสเฟต แต่อัตราการใช้จุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9 จะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของพืช และชนิดของดิน โดยจากการรวบรวมผลงานวิจัย พบว่าในดินกรดปานกลางใช้ในอัตรา 100 กิโลกรัมต่อไร่ หากในดินที่มีปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดในดินต่ำควรมีการจัดการร่วมกับการใช้หินฟอสเฟต โดยใช้จุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9 อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ ร่วมกับการใช้หินฟอสเฟต อัตรา 100 กิโลกรัมต่อไร่ ในกรณีผักกินผล เช่น กระเจี๊ยบเขียว ใช้จุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9 อัตรา 150 กิโลกรัมต่อไร่ สำหรับดินที่มีสภาพกรดจัดที่ใช้ในการปลูกข้าว ใช้อัตรา 100 กิโลกรัมต่อไร่ ถ้าเป็นพืชตระกูลหัวใต้ดิน เช่น หอมแดง ใช้อัตรา 150 กิโลกรัมต่อไร่ แต่มันสำปะหลังซึ่งต้องการธาตุอาหารมากกว่าใช้อัตรา 400 กิโลกรัมต่อไร่ แต่ในดินที่มีความเป็นกรดรุนแรงมากประมาณ 3.5 ควรมีการยกระดับค่าความเป็นกรดให้อยู่ในช่วงกรดจัดประมาณ 5.0-5.5 ร่วมกับการใส่จุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9 อัตรา 50-100 กิโลกรัมต่อไร่

ข้อจำกัดการใช้จุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9 เนื่องจากจุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9 เป็นจุลินทรีย์ในกลุ่มเฮสเทอร์โรโทรป ซึ่งจำเป็นต้องใช้สารอินทรีย์เป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงานในการดำเนินกิจกรรม ทำให้ดินที่มีอินทรียวัตถุในดินต่ำการใช้จุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9 อาจไม่เห็นผล จึงควรเพิ่มปุ๋ยอินทรีย์ในดินร่วมกับการใช้จุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9 เช่น การไถกลบตอซังพืชหลังเก็บเกี่ยวผลผลิต การปลูกพืชปุ๋ยสดและสับกลบลงในดิน และการใช้ปุ๋ยคอกปุ๋ยหมัก เป็นต้น ขณะที่ในดินที่มีฟอสฟอรัสต่ำมากๆ ควรมีการเพิ่มแหล่งฟอสฟอรัสให้แก่ดิน เช่น การใช้จุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9 อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ ร่วมกับหินฟอสเฟต อัตรา 100 กิโลกรัมต่อไร่ สามารถเพิ่มผลผลิตข้าวโพดหวานได้สูงกว่าการใส่หินฟอสเฟตเพียงอย่างเดียว และในดินที่มีความเป็นกรดรุนแรงมาก โดยเฉพาะดินเปรี้ยวจัด ต้องมีการจัดการดินอื่นๆ ร่วมด้วย เช่น การยกระดับความเป็นกรดเป็นด่างของดินเปรี้ยวจัดด้วยปูนจากสภาพความเป็นกรดรุนแรง คือ 3.5 เป็นสภาพกรดจัด คือ 5.5 ร่วมกับการใช้จุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9

อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ สามารถเพิ่มผลผลิตกระเจี๊ยบเขียวได้สูงกว่าการใส่ปูนตามค่าความต้องการปูนร่วมกับปุ๋ยเคมีฟอสฟอรัสตามค่าวิเคราะห์ดิน และยังสามารถลดปริมาณการใช้ปูน

การใช้แบคทีเรีย *Burkholderia* sp. เพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสและผลผลิตพืช พบว่ามีการศึกษาแบคทีเรีย *Burkholderia* sp. และนำมาใช้ประโยชน์หลายสายพันธุ์ เช่น *Burkholderia vietnamiensis, Burkholderia ubonensis*, *Burkholderia seminalis*, *Burkholderia thailandensis, Burkholderia tropica* และ *Burkholderia pyrrocinia* โดยแบคทีเรีย *Burkhorderia* sp. มีประสิทธิภาพในการละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตที่แตกต่างกันอยู่ในช่วง 3.40-400 มิลลิกรัมต่อลิตร ขึ้นอยู่กับชนิดของจุลินทรีย์และชนิดของดิน มีความทนทานต่อสภาพความเป็นกรดเป็นด่างของดินในช่วง 5.5-8.5 มีการศึกษาและนำไปใช้ประโยชน์ในดินทุกสภาพ และมีประสิทธิภาพสูงในการละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตที่ถูกดูดยึดในดิน ช่วยเพิ่มการเจริญเติบโตและผลผลิตพืช ช่วยลดปริมาณการใช้ปุ๋ยเคมีฟอสฟอรัส และลดต้นทุนการผลิตพืช นอกจากนี้ยังมีประสิทธิภาพในการควบคุมเชื้อสาเหตุโรคพืช กำจัดสารตกค้างในดิน และผลิตสารเสริมการเจริญเติบโตของพืชหลายชนิด ซึ่งแบคทีเรีย *Burkholderia* sp. มีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ปุ๋ยชีวภาพละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตในดิน

4.2 ข้อเสนอแนะ

1. ปริมาณจุลินทรีย์ละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตที่ขยายเพื่อเพิ่มปริมาณ ต้องมีปริมาณไม่ต่ำกว่า 10^7 โคโลนีต่อกรัม เพื่อให้สามารถแข่งขันกับจุลินทรีย์ที่อยู่ในดิน และสามารถมีชีวิตอยู่รอดและดำเนินกิจกรรมในดินได้ดี

2. จุลินทรีย์ละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตต้องการสารอินทรีย์เป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงาน จึงควรเติมอินทรียวัตถุต่างๆ ลงในดินจะช่วยส่งเสริมกิจกรรมของจุลินทรีย์ละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตได้ จึงไม่ควรเผาตอซังพืชหลังเก็บเกี่ยวผลผลิตจะทำลายอินทรียวัตถุในดิน

3. ดินที่มีปริมาณฟอสฟอรัสในดินต่ำมากๆ และดินเปรี้ยวจัด ควรมีการศึกษาการใช้ประโยชน์จุลินทรีย์ละลายอนินทรีย์ฟอสเฟต ร่วมกับปุ๋ยเคมีฟอสฟอรัส และแหล่งฟอสฟอรัสอื่นๆ เช่น หินฟอสเฟต เพื่อเพิ่มแหล่งฟอสฟอรัสและกิจกรรมของจุลินทรีย์ เนื่องจากประสิทธิภาพและกิจกรรมของจุลินทรีย์ละลายอนินทรีย์ฟอสเฟต ขึ้นอยู่ปริมาณและชนิดของฟอสฟอรัสในดิน

4. ดินที่มีความเป็นกรดรุนแรงมาก โดยเฉพาะดินเปรี้ยวจัด ควรมีการศึกษาการจัดการดินโดยการยกระดับค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดินให้ได้ระดับหนึ่ง ซึ่งอาจไม่ถึงค่าความต้องการปูนของดิน ร่วมกับการใช้จุลินทรีย์ละลายฟอสเฟตซุปเปอร์ พด.9 เพื่อเพิ่มกิจกรรม และปริมาณการละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตของจุลินทรีย์ และยังเป็นการช่วยลดอัตราการใช้ปูนในการปรับปรุงดิน

4.3 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. เป็นข้อมูลให้นักวิชาการเกษตร ส่งเสริมการเกษตร และประชาชนทั่วที่สนใจสามารถนำข้อมูลที่รวบรวมได้ ทั้งข้อมูลการแยก คัดเลือก การใช้ประโยชน์ และข้อจำกัดการใช้จุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9 นำไปประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงบำรุงดินเพื่อเพิ่มผลผลิตและลดต้นทุนการผลิตพืช ได้อย่างถูกต้องเหมาะสมตามชนิดพืช และสภาพความเป็นกรดเป็นด่างของดิน

2. เป็นข้อมูลพื้นฐานให้นักวิชาการเกษตร ส่งเสริมการเกษตร และนักวิจัยทางการเกษตร สามารถนำข้อมูลที่รวบรวมได้ ไปวิจัยต่อยอดในประเด็นที่ยังไม่ชัดเจน หรือพัฒนาจุลินทรีย์และผลิตภัณฑ์ใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

3. เป็นข้อมูลประกอบเพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงดินที่มีปัญหาการดูดยึดฟอสฟอรัสในดิน เช่น ดินที่มีสภาพเป็นกรด ดินเปรี้ยวจัด เป็นต้น ให้แก่เกษตรกร หน่วยงานภาครัฐและเอกชน และประชาชนทั่วไปที่สนใจ

เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาที่ดิน. 2532. **การจัดการดินและพืชเพื่อปรับปรุงดินอินทรียวัตถุต่ำ**. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

_____. 2553. ยุทธศาสตร์การพัฒนาที่ดินในช่วงแผนพัฒนาเศษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 11 (พ.ศ. 2555-2559) (ฉบับปรับปรุง ณ วันที่ 18 มกราคม 2556). *ใน* **เอกสารการประกอบการประชุมกรมพัฒนาที่ดิน**. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

_____. 2554. **ผลิตภัณฑ์เทคโนโลยีชีวภาพเพื่อเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร.** กรมพัฒนาที่ดิน. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

_____. 2558. **สถานภาพทรัพยากรดินและที่ดินของประเทศไทย**. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

กัญญาพร สังข์แก้ว สุวรรณภา บุญจงรักษ์ และวรรณา สุวรรณวิจิตร. 2555**. การใช้ผลิตภัณฑ์จุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9 เพื่อเพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสและผลผลิตพืช.** รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. 2548. **ปฐพีวิทยาเบื้องต้น**. ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

เจริญ เจริญจำรัสชีพ กำชัย กาญจนธนเศรษฐ และเมธิน ศิริวงศ์. 2540. **การจัดการดินกรดในประเทศไทย**. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

ทองคำ รวมธรรม. 2555. **การใช้ผลิตภัณฑ์จุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9 เพื่อเพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดินกรดจัดและผลผลิตข้าวไวแสง.** รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

ธงชัย มาลา. 2546. **ปุ๋ยอินทรีย์และปุ๋ยชีวภาพ: เทคนิคการผลิตและการใช้ประโยชน์**. ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

นริศ หนูจันทร์. 2551. **อิทธิพลของการใส่ปูนและฟอฟอรัสต่อการเจริญเติบโตของข้าวโพดหวานที่ปลูกในดินกรด.** วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาทรัพยากรที่ดินและสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

นวลจันทร์ ชะบา. 2555. **การใช้ผลิตภัณฑ์จุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9 เพื่อเพิ่มการละลายหินฟอสเฟตและผลผลิตข้าวโพดหวาน**. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

นวลจันทร์ ภาสดา วุฒิชัย จันทรสมบัติ และมนต์ระวี พีราวัชร. 2553. **คัดเลือกจุลินทรีย์ละลายฟอสเฟต**. รายงานฉบับสมบูรณ์ กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

นิรันดร์ สุขจันทร์ และวันชัย ถนอมทรัพย์. 2555. การใช้วัสดุอินทรีย์และปูนมาร์ลในการปรับปรุงดินกรดสำหรับปลูกข้าวโพด. *ใน* **เอกสารประกอบการบรรยายประชุมวิชาการข้าวโพดข้าวฟ่างแห่งชาติ ครั้งที่ 30**. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

นิสุดา ทองคำพันธุ์. 2555**. การใช้ผลิตภัณฑ์จุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9 เพื่อเพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดินเปรี้ยวจัดและผลผลิตข้าวไม่ไวแสง**. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

บรรเจิดลักษณ์ จินตฤทธิ์ รติกร ณ ลำปาง กัญญาพร สังข์แก้ว และรสมาลิน ณ ระนอง. 2553. ศึกษาการจัดการดินเปรี้ยวจัดและดินกรดเพื่อการผลิตข้าวที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง. *ใน* **เอกสารการประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 53**. ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, กรุงเทพฯ.

ประสิทธิ์ ตันประภาส. 2555. **การใช้ผลิตภัณฑ์จุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9 เพื่อเพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดินเปรี้ยวและผลผลิตกระเจี๊ยบเขียว**. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

ปัทมา วิตยากร. 2543. **ความอุดมสมบูรณ์ของดินขั้นสูง**. ภาควิชาทรัพยากรที่ดินและสิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

พิลาสลักษณ์ ลุ่นลิ่ว. 2555. **การใช้ผลิตภัณฑ์จุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9 เพื่อเพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดินกรดปานกลางและผลผลิตกระเจี๊ยบเขียว.** รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

เพิ่มพูน กีรติกสิกร . 2542. กลไกและลักษณะการตรึงโบรอนในดิน. **วารสารดินและปุย.** 21: 4-10.

ยุทธสงค์ นามสาย สุกัญญา หันน้ำเที่ยง และนภาพร ศรีบัณฑิต. 2555. **การใช้จุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด. 9 เพื่อเพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดินกรดและผลผลิตมันสำปะหลังในกลุ่มชุดดินที่ 40 จังหวัดนครราชสีมา**. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

ศิราณี วงศ์กระจ่าง และบัญชา รัตนีทู. 2557. การจัดการดินกรดโดยใช้ปูนและอินทรียวัตถุ. **วารสารมหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์**. 6: (1) 103-112.

สรสิทธิ์ รัชโรทยาน. 2535. **ความอุดมสมบูรณ์ของดิน**. ภาควิชาปฐพีศาสตร์ คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สาคร เหมือนตา. 2555. **การใช้ผลิตภัณฑ์จุลินทรีย์ซุปเปอร์ พด.9 เพื่อเพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดินกรดจัดและผลผลิตหอมแดง**.รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2558. **ปริมาณและมูลค่าการนำเข้าปุ๋ยเคมีสูตรที่สำคัญ ปี 2552-2557.** อ้างอิงจากฝ่ายปุ๋ยเคมี สำนักควบคุมพืชและวัสดุการเกษตร กรมวิชาการเกษตร.

อาภารัตน์ มหาขันธ์. 2549. **ปุ๋ยชีวภาพจากจุลินทรีย์ละลายฟอสเฟตกับอนาคตการเกษตรของประเทศไทย**. กองประชาสัมพันธ์ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่ง ประเทศไทย (วว.), ปทุมธานี.

Asuming-Brempong, S. 2014. Sustainable growth of rice in Ghana : role of biofertilizer (Phosphate solubilizing microorganisms and Azolla anabaena) to rice improvement. **Global Advaned Researh journal of Agricultural Science**. 3(1): 001-007.

Bashan, Y., A.A. Kamnev and D.E. Basshan. 2013. A proposal for isolating and testing phosphate-solubilizing bacteria that enhance plant growth. **Biol. Fertil. Soils.** 49: 1-2.

Compant, S., B. Reiter, A. Sessitsch, J. Nowak, C. Clement and E.A. Barka. 2005. Endophytic colonization of *Vitis vinifera* L. by plant growth-promoting bacterium *Burkholderia* sp. Stain PsJN**. Appl. Environ. Microbiol**. 71: 1685-1693.

Dar, A. I., F. Saleem, M. Ahmad, M. Tariq, A. Khan, A. Ali, B. Tabassum, Q. Ali, G.A. Khan, B. Rashid, I.A. Nasir and T. Husnain. 2014. Characterization and efficiency assessment of PGPR for enhancement of rice (*Oryza sativa* L.) yield. **Advancements in Life Sciences – International Quarterly Journal of Biological Sciences**. 2(1): 38-45.

Estrada-de, l.S., R. Bustillos-Cristales and J. Caballero-Mellado. 2001. *Burkholderia*, a genus rich in plant-associated nitrogen fixer with environmental and geographic distribution**. Appl. Environ. Microbiol**. 67: 2790-2798.

Goenadi, D., H. Siswanto and Y. Sugiarto. 2000. Bioactivation of poorly soluble phosphate rocks with a phosphate-solubilizing fungus. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 64: 927-932.

Gupta, R.R., R. Singal, A. Shanker, R.C. Kuhhad and R.K. Saxena. 1994. Amodified plate assay for secreening phosphate solubilizing microorganisms. **J. Gen. Appl. Microbiol.** 40: 255-260.

Gyaneshwar, P., G.N. Kumar, L.J. Parekh and P.S. Poole. 2002. Role of soil Microorganism in improving P Nutrition of plants. **Plant and Soil.** 245: 83-93.

Han, J., D. Xia, L. Li, L. Sun, K. Yang and L. Zhang. 2009. Diversity of culturable bacteria isolation from root domains of moso bamboo (*Phyllostachys edulis*). **Microb. Ecol**. 58: 367-373.

Illmer, P. and F. Schinner. 1992. Solubilization of inorganic phosphate by microorganism isolate from forest soil. **Soil Bio. Biochem**. 24: 389-395.

_____, A. Barbado and F. Schinner. 1995. Solubilization of hardly soluble $AlPO_4$ with P-solubilizing microorganisms. **Soil Bio. Biochem.** 27: 265-270.

Janssen, P.H.. 2006. Indentifying the dominant soil bacteria taxa in libraries of 16S rRNA and 16S rRNA genus. **App. Environ. Microbiol.** 72: 1719-1728.

Kailasan, N. A. and V. S. Vamanrao. 2015. Isolation and characterization of ralstonia pickettii–A novel phosphate solubilizing bacterium from pomegranate rhizosphere from Western India. **Internatioal Journal of Life Sciences Biotechnology and Phrma Research.** 4(1): 1-9

Kannapiran, E and V.S. Ramkumar. 2011. Isolation of phosphate solubilizing bacteria from sediment of Thondi coast, Palk Strait, Southeast coast of India. **Annals of Biological Research**. 25: 157-163.

Karpagam, T. and P.K. Nagalakshmi. 2014. Isolation and characterization of phosphate solubilizing microbes from agricultural soil. Int. J. Curr. **Microbiol. App. Sci.** 3(3): 601-614.

Khan, A.A., G. Jilani, S.M. Akhtar, S.M.S. Navi and M. Rasheed. 2009. Phosphorus solubilizing bacteria: occurrence, mechanisms and their role in crop production. **J. Agric. Biol. Sci**. 1(1): 48-58.

Linu, M.S., J. Stephen and M.S. Jisha. 2009. Phosphate solubilizing *Gluconacetobacter* sp. *Burkholderia* sp. and their potential interaction with cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp**.). International Journal of Agricultural Research.** 4(2): 79-87.

Luvizotto, D.M, J. Marcon, F.D. Andreote, F. Dini-Andreote, A.A.C., W.L. Neve and A.A. ARujo Pizzirani-Kleiner. 2010. Genetic diversity and plant-growth related feature of *Burkholderia* spp. from sugarcane roots. **World J. Microbiol. Biotechnol.** 26: 1829-1836.

Munusamy, M., S. Poonguzhali, S.W. Kwon, M.H. Song and T. Sa. 2008. Molecular Characterization of *Burkholderia* Strains Isolation from Rice Cultivars (*Oryza sativa* L.) for Species Identification and Phylogenetic Grouping. **J. Microbiol. Biotechnol.** 18(6): 1005-1010.

Nahas, E., D.A. Banatto and L.C. Assis. 1990. Fluorapatite solubilization by *Aspergillus niger* in vinasse medium. **Soil Bio. Biochem.** 22: 1097-1101.

Pandey, A., N. Das, B. Kumar, K. Rinu and and P. Trivedi. 2008. Phosphate solubilization by *Penicilium* spp. Isolated from soil samples of India Himalayan region. **World J. Microbiol. Biotechnol.** 24: 97-102.

Panhwar, Q.A., R. Othman, A. Z. Rahman, M. Sariah, I. Mohd Razi and U.A. Naher. 2011. Contribution of phosphate-solubilizing bacteria in phosphorus bioavailability and growth enhancement of aerobic rice. **Spanish Journal of Agricultural Research**. 9(3): 810-820.

_____, Q.A., R. Othman, A. Z. Rahman, S. Meon and M.R. Ismail. 2012. Isolation and characterization of phosphate-solubilizing bacteria from aerobic rice. **African Journal of Biotechnology.** 11(11): 2711-2719.

_____, Q.A., U.M. Naher, S. Jusop, R. Othman, M.A. Latif and M.R. Ismail. 2014. Biochemical and molecular characterization of potential phosphate-solubilizing

bacteria in acid sulfate soil and their beneficial effects on rice growth**. PLOS. ONE.** 7: 187-196.

_____, Q.A., U.A. Naher, O. Radziah, J. Shamshuddin and I.M. Razi. 2015. Eliminating aluminum tocixity in an acid sulfate soil for rice cultivation using plant growth promoting bacteria. **Molecules.** 20: 3628-3646.

Perin, L., L. Martinez-Aguilar, R. Caballero-Gonzallez, P. Estrada-de los Santos, T. Cabellos-Avelar, H.V. Guedes, V.M. Reis and J. Caballero-Mellado. 2006. Diazottrophic *Burkholderia* species with field-grown maize and sugarcane. Appl. **Environ. Microbiol.** 72: 3103-3110.

Pikovskaya, R.I. 1948. Mobilization of phosphate in soil in conection with vital activity of some microbial species. **Microbiology.** 17: 362-370.

Poonguzhali, S. Madhaiyan and T. Sa. 2008. Isolation and identification of phosphate solubilizing Bacteria from Chinese cabbage and their effect on growth and phosphorus utilization of plants. **J. Microbiol. Biotechnol.** 18: 773-777.

Rashid, M., S. Khalil, N. Ayub, S. Alam and F. Latif. 2004. Organic acids production and phosphate solubilization by phosphate solubilizing microorganisms (PSM) under in vitro conditions Pakistan**. J. Biol. Sci**. 7(2): 187-196.

Rodriguez, H. and R. Fraga. 1999. Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion. **Biotechnology Advances**. 17: 319-339.

Shaharoona, J. G.M. Jamro, Z.A. Zahir, M. Arshad and K.S. Memon. 2007. Effectiveeness of various *Pseudomonas* spp. and *Burkhoderia caryophylli* containing ACC-deaminase for improving growth and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.). **J. Microbiol. Biotechnol.** 17: 1300-1307.

Sharma, B.S., 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: 12-14.

Singh, M K, D.P. Singh, S. Mesapogu, B.K. Babu and C. Bontempe. 2011. Concomitant colonization of positive endophytic *Burkholderia* sp. In rice (*Oryza sativa* L.) promotes plant growth. **World J. Microbiol. Biotechnol.** 27: 2023-2031.

Song, O.R., S.J. Lee, Y.S. Lee, S.C. Lee, K. Kim and Y.L. Choi. 2008. Solubilization of insoluble inorganic photphate by *Burkholderia cepacia* DA23 isolation from cultivation soil**. Brazilian Journal of Microbiology**. 39: 151-156.

Stephen, J. and M.S. Jisha. 2011. Gluconic acid production as the principal mechanism of mineral Phosphate solubilization by *Burkholderia* sp. (MTCC 8369). **Journal of Tropical Agricultrue.** 49: 99-103.

_____, J., S. Shabanamol, K.S. Rishad and M.S. Jisha. 2015. Growth enhancement of rice (*Oryza sativa*) by phosphate solubilizing *Gluconacetobacter sp.* (MTCC 8368) and *Burkholderia* sp. (MTCC 8369) under greenhouse condition. **Biotech**. 5: 831-837.

Surapat, W., P. Charida, R. Pongsak, A. Tadanori and B. Sophon. 2013. Characteristics of phosphate Solubilization by phosphate-solubilizing bacteria isolated from agricultural chili soil and their efficiency on the growth of chili (*Capsicum Frutescens* L. cv. Hua Rua). **Chiang Mai. J. Sci** . 40(1): 11-25.

Takeuchi, M. K. Hamana and A. Hiraishi. 2001. Proposal of the genus Sphingomnas sensu stricto and three new genera, Shingobium, Nouosphingobium and Sphingopyxis, on the basis of phylogenetic and chemotaxonomic analyses. **Inter. J. Syst. Evo. Microbiol.** 51: 1405-1417.

Turan, M., N. Ataoglu and F. Sahin. 2006. Evaluation of the capacity of phosphate solubilizing bacteria and fungi on different froms phosphorus in liquid culture**. J. Sustain Agr.** 28: 99-108.

Zhen, Z., L. Haitao, W. Na, G. Liyue, M. Jie, D. Na, W. Guanglei and J. Gaoming. 20141. Effects of Manure Compost Application on Soil Microbial Community Diversity and Soil Microenvironments in a Temperate Cropland in China. **PLOS ONE**. 10(9): 1-12.

Zhao, K., P. Petri, Z. Xiaoping, A. Xiaoling, L. Maoke, Y. Xiumei and C. Qiang. 2014. Maize rhizosphere in Sichuan, China, hosts plant growth promoting *Burkholderia cepacia* with phosphate solubilizing and antifungal abilities. **Microbiological Research**. 169 : 76-82.

Zaidi, A., W.S. Khan, M. Ahemad, M. Oves and P.A. Wani. 2009. Recent Advances in Plant Growth Promotion by Phosphate-Solubilizing Microbes. pp. 23-50 *In*: Khan MS et al. (eds) **Microbial Strategies for Crop Improvement**. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.

Zhou, K., D. Binkley and K.G. Doxtader. 1992. A new method for estimating gross phosphorus minerlization and immobilization rate in soil**. Plant and Soil**. 147: 243-250.

ห้องสมุดกรมพัฒนาที่ดิน