บทที่ 2
แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การทำสวนผลไม้ของจังหวัดจันทบุรี

ผลไม้เมืองร้อนนับเป็นผลิตผลทางการเกษตรที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศ มีการขายทั้งภายในประเทศและมีการส่งออกต่างประเทศ ทั้งนี้ประเทศไทยสามารถผลิตผลไม้เมืองร้อนได้มากมายหลายชนิด ซึ่งมีพื้นที่เพาะปลูกจำนวนมากอยู่ในภาคตะวันออกโดยเฉพาะอย่างยิ่งในจังหวัดจันทบุรี ผลไม้เศรษฐกิจของจันทบุรี มี 7 ชนิด ได้แก่ ทุเรียน เงาะ มังคุด ลองกอง สละ กล้วยไข่ และลำไย ส่วนผลไม้นอกฤดูกาล ได้แก่ ทุเรียน และลำไย ด้านผลไม้ที่มีผลผลิตตลอดปี ได้แก่ กล้วยไข่และสละ ส่วนผลไม้ในฤดูกาล ได้แก่ ทุเรียน เงาะ มังคุด และลองกอง ผลไม้ในฤดูกาลจะออกสู่ตลาดมากในช่วงเดือนพฤษภาคมถึงกรกฎาคม โดยในปี 2561 มีปริมาณผลผลิตรวมกว่า 412,907 ตัน แบ่งเป็น ทุเรียน 279,075 ตัน มังคุด 36,356 ตัน เงาะ 85,915 ตัน ลองกอง 11,561 ตัน (สำนักงานการเกษตรจังหวัดจันทบุรี, 2561 : หน้า 1) และในปี 2562 ประมาณการปริมาณผลผลิตรวมกว่า 576,111 ตัน แบ่งเป็น ทุเรียน 339,292 ตัน มังคุด 125,834 ตัน เงาะ 96,326 ตัน ลองกอง 14,659 ตัน (สำนักงานการเกษตรจังหวัดจันทบุรี, 2562 : หน้า 1) อย่างไรก็ตามการทำสวนผลไม้ของเกษตรกรในจันทบุรีมักใช้สารเคมีเพื่อเร่งผลผลิตและการเจริญของผลไม้ มีผลทำให้ดินมีค่าพีเอชสูงหรือต่ำเกินไป เกิดผลกระทบต่อการดูดซึมแร่ธาตุและการเจริญของพืช แนวทางหนึ่งที่อาจช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวได้คือการทำเกษตรอินทรีย์ที่เน้นการใช้ปุ๋ยชีวภาพเข้ามาเกี่ยวข้องในการทำเกษตร ซึ่งการใช้แบคทีเรียละลายฟอสเฟตในการช่วยละลายฟอสเฟตในดินสวนผลไม้ก็นับเป็นรูปแบบหนึ่งของการดำเนินงานดังกล่าว ตัวอย่างของศูนย์เกษตรอินทรีย์ในจังหวัดจันทบุรี เช่น ศูนย์กสิกรรมธรรมชาติโป่งแรด ตั้งอยู่ที่อำเภอเมือง และศูนย์กสิกรรมธรรมชาติชำปลาไหล ตั้งอยู่ที่อำเภอท่าใหม่ ศูนย์กสิกรรมธรรมชาติมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อให้เกษตรกรปรับเปลี่ยนรูปแบบการทำเกษตรมาเป็นเกษตรอินทรีย์ โดยลดการใช้สารเคมี ลดปัญหาสารตกค้างในผลผลิต และเพิ่มความปลอดภัยแก่ผู้ผลิตและผู้บริโภค (พันธ์จิตต์ สีเหนี่ยง, 2555 : หน้า 52) การทำเกษตรอินทรีย์คือระบบการทำเกษตรที่ไม่มีการใช้สารเคมีและสารปราบศัตรูพืช แต่จะเน้นการใช้อินทรีย์วัตถุ เช่น ปุ๋ยคอก ปุ๋ยหมัก ปุ๋ยพืชสด และปุ๋ยชีวภาพในการบำรุงดินให้มีความสมบูรณ์ เพิ่มความอุดมสมบูรณ์และความหลากหลายทางชีวภาพในดิน ทำให้เกิดสมดุลทางธรรมชาติ โดยมีการปรับให้ระบบการเกษตรคล้ายคลึงกับธรรมชาติที่สุด เพื่อหลีกเลี่ยงการปนเปื้อนของสารเคมีทั้งในดิน น้ำ และอากาศ รวมทั้งเพิ่มความปลอดภัยต่อทั้งผู้ผลิตและผู้บริโภค (อานัฐ ตันโช, 2549 : หน้า 7) สอดคล้องกับนโยบายสำคัญของกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ที่เน้นการส่งเสริมเกษตรอินทรีย์ ซึ่งต้องเร่งขับเคลื่อนการดำเนินงานให้เกิดเป็นรูปธรรมมาก

ยิ่งขึ้นโดยยุทธศาสตร์การพัฒนาเกษตรอินทรีย์แห่งชาติ พ.ศ. 2560 – 2564 มีเป้าหมายในการเพิ่มพื้นที่เกษตรอินทรีย์ไม่น้อยกว่า 600,000 ไร่ ภายในปี 2564 มีเป้าหมายเพิ่มจำนวนเกษตรกรที่ทำเกษตรอินทรีย์ไม่น้อยกว่า 30,000 ราย เพิ่มสัดส่วนตลาดสินค้าเกษตรอินทรีย์ในประเทศต่อตลาดส่งออกโดยมีสัดส่วนตลาดในประเทศร้อยละ 40 ต่อตลาดส่งออกร้อยละ 60 ยกระดับกลุ่มเกษตรอินทรีย์วิถีพื้นบ้านเพิ่มขึ้น (คณะกรรมการพัฒนาเกษตรอินทรีย์แห่งชาติ, 2560 : หน้า 57) จากผลการศึกษา พบว่าเกษตรกรที่ผลิตทุเรียนและมังคุดอินทรีย์ของจังหวัดจันทบุรี มีผลตอบแทนอยู่ในเกณฑ์ที่ดี ในด้านพฤติกรรมผู้บริโภคทุเรียนและมังคุดอินทรีย์ในจังหวัดที่อยู่ระเบียงเศรษฐกิจภาคตะวันออก (EEC) ผู้บริโภคมีแนวโน้มการตัดสินใจเลือกบริโภคผลไม้อินทรีย์มากถึง ร้อยละ 97 และแนะนำให้ผู้อื่นซื้อผลไม้อินทรีย์ถึงร้อยละ 94 (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรที่ 6 จังหวัดชลบุรี, 2561 : หน้า 7) จะเห็นได้ว่าทิศทางของการทำสวนผลไม้ในจังหวัดจันทบุรีจะดำเนินไปในวิถีทางของการทำเกษตรอินทรีย์เพิ่มมากขึ้นในอนาคตอันใกล้นี้

ในจังหวัดจันทบุรีมีศูนย์กสิกรรมธรรมชาติ 2 แห่ง ได้แก่ ศูนย์กสิกรรมธรรมชาติโป่งแรด ตั้งอยู่ที่อำเภอเมืองและศูนย์กสิกรรมธรรมชาติชำปลาไหล ซึ่งตั้งอยู่ที่อำเภอท่าใหม่ วัตถุประสงค์หลักในการก่อตั้งศูนย์กสิกรรมธรรมชาติเพื่อนำหลักปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียงไปสู่การปฏิบัติอย่างเป็นรูปธรรม ให้เกษตรกรปรับเปลี่ยนรูปแบบการทำการเกษตรมาเป็นแบบเกษตรอินทรีย์ที่ลดการใช้สารเคมี ลดปัญหาสารตกค้างในผลผลิต และเพิ่มความปลอดภัยแก่ผู้ผลิตและผู้บริโภค สำหรับพื้นที่บ้านโป่งแรดประกอบด้วย 5 หมู่บ้าน คือ บ้านแถวคลอง บ้านทุ่งว่านเหลือง บ้านตรอกกะทิ บ้านโป่งล่าง และบ้านบ่อลึก ตามลำดับ มีลักษณะภูมิประเทศเป็นที่ลาดเชิงเขา ที่ราบ และที่ราบลุ่ม มีฝนตกตามฤดูกาล ประชากรส่วนใหญ่ประกอบอาชีพทำสวนผลไม้ (ศูนย์กสิกรรมธรรมชาติโป่งแรด, ม.ป.ป.) จากการสอบถามข้อมูลการใช้ปุ๋ยของเกษตรกรบ้านโป่งแรดจะมีการใช้ปุ๋ยเคมีแบบเม็ดที่มีธาตุอาหารหลักไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม N – P – K สูตร 9 – 24 – 24 สูตร 8 – 24 – 24 สูตร 13 – 10 – 27 และสูตร 16 – 16 – 16 เพื่อบำรุงใบ บำรุงดอกผล และปุ๋ยอินทรีย์ที่เกษตรกรใช้คือ ปุ๋ยขี้ไก่อัดเม็ดและปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพ เป็นต้น (อรุณี สุกใส, สัมภาษณ์, 2561)

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

สถานการณ์การเกษตรของโลกในปัจจุบัน

ดินเกิดจากการสลายตัวของหินและแร่ธาตุต่าง ๆ ผสมคลุกเคล้ากับอินทรียวัตถุ ประกอบด้วยแร่ธาตุ อินทรีย์วัตถุ น้ำ อากาศ และสิ่งมีชีวิตในดิน เป็นแหล่งทรัพยากรที่มีความสำคัญทางการเกษตร อาหาร และการรักษากระบวนการของสิ่งมีชีวิตทุกชนิด รวมถึงจุลินทรีย์ดินที่มีบทบาทสำคัญต่อการเจริญของพืช และเป็นดัชนีชี้วัดความอุดมสมบูรณ์ของดิน จุลินทรีย์ที่ส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช หรือพีจีพีอาร์ คือจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในดินบริเวณรอบรากพืช และมีส่วนช่วยในกระบวนการเจริญเติบโต ตามรายงานของ Gupta และคนอื่น ๆ กล่าวว่าเชื้อก่อโรคมีผลทำให้พืช

เจริญเติบโตช้า ปริมาณผลผลิตลดลง จัดเป็นปัญหาหลักที่ทำให้เกิดผลเสียต่อวิถีเกษตรยั่งยืนและเสถียรภาพของระบบนิเวศ (Ecosystem stability) ทั่วโลก ปุ๋ยและสารเคมีที่เกษตรกรใช้เพื่อเพิ่มผลผลิต ทำลายเชื้อก่อโรคพืช แมลง และวัชพืชชนิดต่าง ๆ กลับทำให้เกิดผลกระทบในทางลบอย่างยิ่งต่อระบบนิเวศ โดยที่ในปัจจุบันคนทั่วไปเริ่มตระหนักถึงผลข้างเคียงของการใช้สารเคมีในภาคเกษตรกรรม เป็นผลให้มีการศึกษาเพื่อทำความเข้าใจถึงกิจกรรมแบบพึ่งพาอาศัยกันระหว่างพืชและประชากรจุลินทรีย์ที่อยู่บริเวณรากพืชเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจึงเป็นความจำเป็นเร่งด่วนในการเพิ่มการยอมรับและขยายวงกว้างในการใช้งานสารชีวภัณฑ์ทางการเกษตร (Biological agents) ทั่วโลก การใช้พีจีพีอาร์เป็นทางเลือกที่ดีในการแก้ปัญหาดังกล่าว โดยแบคทีเรียกลุ่มนี้มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน ส่งเสริมการเจริญของพืช และลดการเจริญของเชื้อก่อโรคพืช (Phytopathogens) และทำให้เกิดวิถีการเกษตรแบบยั่งยืนที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Ecofriendly sustainable agriculture) (Gupta, G. et al. 2015 : pp. 96)

บทบาทของฟอสฟอรัสต่อการเจริญของพืช

ธาตุอาหารพืชเป็นหนึ่งในปัจจัยที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโต การให้ผลผลิตและคุณภาพของพืช โดยเฉพาะธาตุมหัพภาค (ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียมและแมกนีเซียม) โดยธาตุอาหารเหล่านี้มีส่วนเกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโต โครงสร้างพืช การออกดอก การให้ผลผลิตและคุณภาพของพืช การที่พืชได้รับธาตุอาหารเกินความต้องการ พืชอาจแสดงอาการเป็นพิษ หรือหากได้รับในปริมาณที่ไม่เพียงพอ ย่อมส่งผลต่อปริมาณและคุณภาพของผลผลิตด้วยเช่นกัน (อนงนาฏ ศรีประโชติ และคนอื่น ๆ, 2560 : หน้า 55) ฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารหลักชนิดหนึ่งของพืช ที่มีบทบาทเกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตและการสร้างผลผลิต โดยพบธาตุฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบหลักในนิวเคลียสและโครโมโซมของเซลล์ เป็นส่วนประกอบของสารพันธุกรรม และมีบทบาทสำคัญในกระบวนการหายใจ การสังเคราะห์แสง แป้ง โปรตีน และไขมัน ด้วยเหตุนี้ฟอสฟอรัสจึงมีผลกระตุ้นการเจริญเติบโตของราก การออกดอก ออกผลรวมถึงการสุกงอมของผล (ภาวนา ลิกขนานนท์ และคนอื่น ๆ, ม.ป.ป. : หน้า 1) โดยฟอสฟอรัสที่พบในดินจะมีอยู่ 2 รูป คือ ฟอสฟอรัสอินทรีย์ เช่น ไฟติน (Phytin) ฟอสฟอไลปิด กรดนิวคลีอิค อีกรูปหนึ่งคือฟอสฟอรัสอนินทรีย์ เช่น สารประกอบฟอสเฟตของแคลเซียม แมกนีเซียม เหล็ก อะลูมิเนียม และฟลูออรีน ฟอสเฟตไอออนในดินมักจะถูกยึดอยู่ในอนุภาคของดินเหนียวหรืออาจรวมตัวกับธาตุอื่น ๆ ในดิน ในสภาพดินที่เป็นกรดหรือด่างมากเกินไปทำให้พืชไม่สามารถนำไปใช้ได้ เมื่อพืชขาดฟอสฟอรัสจะส่งผลต่อกระบวนการเมแทบอลิซึมต่าง ๆ ภายในเซลล์ ทำให้พืชเจริญเติบโตได้ช้า ดังนั้นในสภาพดินที่เป็นกลางจะช่วยทำให้ฟอสเฟตไอออนอยู่ในรูปที่พืชนำไปใช้ได้ง่ายกว่า (มานี เตื้อสกุล, 2550 : หน้า 306)

ความสำคัญของฟอสฟอรัส

ฟอสฟอรัส (Phosphorus; P) มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชโดยช่วยกระตุ้นการเจริญของรากแขนงและรากฝอย ช่วยในการเจริญเติบโตของราก ช่วยให้รากดูดน้ำและธาตุอาหารได้ดี กระตุ้นการออกดอกของพืช ช่วยลดผลเสียที่อาจเกิดจากพืชได้รับไนโตรเจนมากเกินไป ฟอสฟอรัสจะช่วยลดการเจริญเติบโตทางกิ่งก้านสาขาที่มากเกินไปทำให้พืชสามารถออกดอกได้ ช่วยให้พืชมีพัฒนาการด้านการสุก แต่ถ้าหากได้รับในปริมาณที่สูงเกินไปจะส่งผลต่อคุณภาพผลผลิตได้ คือ พืชจะแก่เร็วกว่าปกติ แตกยอดอ่อนได้เร็ว แต่ใบจะไม่พัฒนา คือ ใบเล็ก ข้อสั้น แคระแกร็น เสียคุณภาพ นอกจากนี้ฟอสฟอรัสยังช่วยเพิ่มความต้านทานต่อโรคพืชบางชนิดได้ เนตรนภา อินสลุด ทศพร บ่อบัวทอง และกิตติพจน์ แย้มจันทร์ (2561 : หน้า 2) รายงานว่าฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของข้าว ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์เป็นตัวจำกัดการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตของข้าว ในแต่ละระยะการเจริญเติบโตของข้าวต้องการปริมาณฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน โดยศูนย์ส่งเสริมเทคโนโลยีการเกษตรด้านอารักขาพืช จังหวัดสงขลารายงานว่าสาเหตุของความขาดแคลนธาตุอาหารของพืช เกิดจาก 3 สาเหตุคือ 1) ธาตุอาหารในดินมีน้อย 2) ธาตุอาหารในดินมีมากแต่อยู่ในรูปที่พืชนำไปใช้ไม่ได้ ซึ่งพืชจะดูดสารอาหารในรูปที่เป็นประโยชน์เท่านั้น หากคุณสมบัติทางเคมีไม่เหมาะสมและธาตุเหล่านั้นอยู่ในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ พืชย่อมดูดไปใช้ได้ยาก ความขาดแคลนของธาตุอาหารพืชบางชนิดเกิดจากการขาดสมดุลของธาตุอาหาร เช่น การใส่ปุ๋ยฟอสเฟตในอัตราสูงทำให้พืชขาดธาตุเหล็กและสังกะสีได้เป็นต้น และ 3) คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของดินไม่เอื้อต่อการเจริญเติบโตของราก (ศูนย์ส่งเสริมเทคโนโลยีการเกษตรด้านอารักขาพืช จังหวัดสงขลา, 2561 : หน้า 12)

พืชที่ขาดธาตุฟอสฟอรัสแสดงอาการผิดปกติ คือ พืชล้มลุกจะมีการเจริญเติบโตช้าหรือชะงักการเจริญ ถ้าเป็นระยะการออกดอกออกผลจะมีดอกและผลลดลง บนแผ่นใบจะปรากฏความผิดปกติโดยเฉพาะสีของใบมีสีม่วงปรากฏตามเส้นที่อยู่ใต้ใบ ก้านใบมีสีม่วงแต้มประปราย การเจริญเติบโตของส่วนรากมีน้อย โดยรวมจะพบว่าพืชแคระแกร็น สำหรับไม้ยืนต้นและไม้พุ่มก็จะมีลักษณะคล้ายกัน คือ พืชมีการเจริญเติบโตช้า มีกิ่งก้านใบน้อย ส่วนของใบมีสีบรอนซ์ขุ่นมัว ไปจนถึงสีม่วง และใบจะร่วงเร็วกว่ากำหนด อาการขาดฟอสฟอรัสที่แสดงออกจะปรากฏในครั้งแรกในส่วนของใบแก่ก่อน แล้วจึงลุกลามมายังใบที่อยู่ถัดขึ้นไปตามลำดับของความรุนแรงของการขาดฟอสฟอรัสของพืช ทั้งนี้เพราะฟอสฟอรัสเป็นธาตุที่เคลื่อนที่ได้ง่ายในพืชเช่นเดียวกับธาตุไนโตรเจน (วิเชียร ฝอยพิกุล, 2548 : หน้า 4) โดยศูนย์ส่งเสริมเทคโนโลยีการเกษตรด้านอารักขาพืช จังหวัดสงขลา รายงานแนวทางการวินิจฉัยการขาดธาตุฟอสฟอรัสแบบรวดเร็วของพืช ซึ่งพบอาการครั้งแรกที่ใบแก่ สีใบสม่ำเสมอทั่วแผ่นใบ ผิวใบด้านไม่ขึ้นมัน สีเข้มเป็นสีเขียวปนน้ำเงิน หรือเขียวปนม่วง การเจริญเติบโตลดลง (ศูนย์ส่งเสริมเทคโนโลยีการเกษตรด้านอารักขาพืช จังหวัดสงขลา, 2561 : หน้า 12) การขาดฟอสฟอรัสของพื

สามารถเกิดจากหลายสาเหตุ เช่น การถูกชะล้างจนทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสในดินต่ำลง หรือมีฟอสฟอรัสในดินในปริมาณสูงแต่ถูกตรึงอยู่กับธาตุอื่น ทำให้ข้าวไม่สามารถดูดไปใช้ได้ ในกรณีที่ดินมีค่าพีเอชต่ำหรือเป็นกรด ฟอสฟอรัสจะถูกตรึงด้วยปฏิกิริยาของ Al หรือ Fe ในขณะที่ดินมีค่าพีเอชสูงหรือเป็นด่าง ฟอสฟอรัสมักถูกตรึงด้วยปฏิกิริยาของ Ca และ Mg ปริมาณฟอสฟอรัสที่ข้าวได้รับนั้นส่งผลโดยตรงต่อการเจริญเติบโตของข้าว เมื่อข้าวขาดฟอสฟอรัสมักจะมีการพัฒนาระบบรากช้า แตกกอน้อย ลำต้นแคระแกร็น ใบแคบสั้นสีเขียวเข้ม และไม่ตอบสนองต่อปุ๋ยไนโตรเจน (เนตรนภา อินสลุด ทศพร บ่อบัวทอง และกิตติพจน์ แย้มจันทร์, 2561 : หน้า 2)

ปริมาณฟอสฟอรัสในดิน

ฟอสฟอรัสในธรรมชาติมี 2 รูปแบบ คือ ฟอสฟอรัสอินทรีย์และอนินทรีย์ ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในดินอยู่ในช่วง 0.02 – 0.5 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.05 เปอร์เซ็นต์ และส่วนใหญ่อยู่ในรูปออร์โทฟอสเฟส (Orthophosphate) ฟอสฟอรัสในสารละลายดินทั่วไปแบ่งเป็นอนินทรีย์ฟอสฟอรัสและอินทรีย์ฟอสฟอรัส (ภาวนา ลิกขนานนท์ และคณะ, ม.ป.ป : หน้า 2) ฟอสฟอรัสในรูปสารประกอบที่สิ่งมีชีวิตนำไปใช้ไม่ได้ เช่น แร่หินฟอสเฟต (Rock phosphate) แคลเซียมฟอสเฟต ($Ca(PO_4)^{3-}$) เฟอร์ริกฟอสเฟต ($Fe(PO_4)^{3-}$) แมกนีเซียมฟอสเฟต ($Mg(PO_4)^{3-}$) และอลูมิเนียมฟอสเฟต ($Al(PO_4)^{3-}$) ปัจจัยที่มีผลต่อฟอสฟอรัสในดินได้แก่ ระดับพีเอช ปริมาณสารต่าง ๆ ในดินและการเกิดปฏิกิริยาการตรึงฟอสฟอรัสในดิน (มุกดา สุขสวัสดิ์, 2544 : หน้า 13) ซึ่งแบ่งได้ 3 ปฏิกิริยา ได้แก่

1. ปฏิกิริยาการดูดซับอยู่ตามผิว

โดยฟอสฟอรัสจะถูกดูดซับอยู่กับแร่ดินเหนียวอินทรียวัตถุ ออกไซด์ของเหล็กและอลูมิเนียมด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals forces) ซึ่งมีผลทำให้ไอออนฟอสเฟตรวมอัดตัวอยู่รอบ ๆ พื้นของคอลลอยด์เท่านั้นโดยโครงสร้างของคอลลอยด์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

2. การดูดซับด้วยพันธะเคมี

การจับกันด้วยแขนของไอออนบวกต่อไอออนลบทำให้เกิดโมเลกุลของสารขึ้น โดยสารเหล่านี้จะมีหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) และซิลิเกต (Silicate) ซึ่งอาจหลุดออกไปเหลือตำแหน่งที่จะต้องทำให้สมดุลด้วยไอออนลบ แล้วไอออนฟอสเฟตจะเข้ามาอยู่ตำแหน่งนี้ ได้ทำให้เกิดการจับตัวกันด้วยพันธะทางเคมี มีโครงสร้างเป็นผลึกไอออนฟอสเฟตที่ถูกดูดซับที่พื้นผิวของแร่ดินเหนียว จะเคลื่อนตัวเข้าไปอยู่ในช่องว่างระหว่างผลึกของแร่ดินเหนียว ทำให้ไอออนฟอสเฟตถูกตรึงอยู่ในสารละลายดิน

3. ปฏิกิริยาการแตกตัว

สารละลายฟอสเฟตที่ละลายได้ดีจะแตกตัวเป็นไอออนฟอสเฟตและไอออนอื่น ๆ ในดิน เช่น เหล็กออกไซด์ อลูมิเนียมออกไซด์ แคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมคาร์บอเนต โดยในสภาวะที่เหมาะสมสารประกอบเหล่านี้จะแตกตัวให้ไอออนบวก เมื่อไอออนฟอสเฟตทำปฏิกิริยากับไอออนบวก

จะได้สารประกอบฟอสเฟตที่ละลายยากยิ่งขึ้น เช่น เหล็กฟอสเฟต อลูมิเนียมฟอสเฟต และแคลเซียมฟอสเฟต ดังสมการ

$$Fe^{3+} + H_2PO_4^- \longrightarrow FePO_4 + 2H^+$$

$$Al^{3+} + HPO_4^{2-} \longrightarrow AlPO_4 + H^+$$

$$3Ca^{2+} + 2HPO_4^{2-} \longrightarrow Ca_3(PO_4)_2 + 2H^+$$

โดยปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตรึงฟอสฟอรัสในดินขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาของดิน เนื่องจากในดินที่มีพีเอชต่ำกว่า 5 ในสารละลายดินจะมีไอออนพวกเหล็ก อลูมิเนียม และแมงกานีส ละลายอยู่ในสารละลายดินมาก ฟอสเฟตจะเข้าทำปฏิกิริยาเกิดเป็นสารประกอบที่ตกตะกอน ไม่มีประโยชน์ต่อพืช ดังสมการ

$$Fe^{3+} + 3H_2PO_4^- \longrightarrow Fe(H_2PO_4)_3$$

เฟอร์ริกไอออน — เฟอร์ริกฟอสเฟต (ตกตะกอน)

$$Al(OH)_3 + 3H_2PO_4^- \longrightarrow Al(H_2PO_4)_3 + 3OH^-$$

อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ — อลูมิเนียมฟอสเฟต (ตกตะกอน)

ในดินด่างที่มีค่าพีเอชสูงกว่า 7 ในสารละลายดินจะมีแคลเซียม แมกนีเซียม และคาร์บอเนตของแคลเซียม แมกนีเซียมอยู่มาก จึงตรึงกับฟอสเฟตได้ง่าย แปรรูปเป็นสารประกอบที่ตกตะกอน ดังสมการ

$$Ca(H_2PO_4)_2 + 2Ca^{2+} \longrightarrow Ca_3(PO4)_2 + H^+$$

(ละลายได้ง่าย) — (ตกตะกอน)

จากข้อมูลดังกล่าวจะเห็นได้ว่า ฟอสฟอรัสในดินส่วนมากอยู่ในรูปที่ละลายยาก เกิดการตกตะกอน พืชไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เพราะในสารละลายดินมีปริมาณฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชอยู่น้อยมาก เนื่องจากทำปฏิกิริยากับสารประกอบต่าง ๆ ในดินได้ดี ดังนั้นดินที่ไม่มีการใส่ปุ๋ยจึงมีฟอสฟอรัสในสารละลายดินประมาณ 0.05 มิลลิกรัม/ลิตร หรือพบน้อยมากไม่เกิน 0.3 มิลลิกรัม/ลิตร (ภาวนา ลิกขนานนท์ และคณะ, ม.ป.ป : หน้า 2) ซึ่งไม่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของพืช สำหรับดินทางการเกษตรการใส่ปุ๋ยเคมีฟอสฟอรัสจึงเป็นสิ่งจำเป็น ในขณะเดียวกันปุ๋ยฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปฟอสเฟตที่ละลายได้ดีเมื่อใส่ลงดินบางส่วนจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปที่ไม่ละลายด้วยกระบวนการตรึงทางเคมี (Chemical fixation of phosphate) ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในดินที่มีค่าพีเอชต่ำกว่า 7 หรือมีค่าพีเอชสูงกว่า 7 ภายในระยะเวลาสั้น ๆ (เกตน์ณนิภา วันชัย และสมาพร

เรืองสังข์, 2557 : หน้า 513) ซึ่งอาจแก้ปัญหาได้โดยการปรับค่าพีเอช การใส่ปูนขาวและการใช้ซิลิเกต เมื่อใช้ร่วมกันจะได้ผลดีขึ้นเพราะเกิดการแย่งกันของอนุมูลซิลิเกตกับฟอสเฟต อีกวิธีหนึ่งคือการใช้อินทรีย์วัตถุ เพราะกิจกรรมของจุลินทรีย์สามารถทำให้เกิดการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสในรูปที่ไม่ละลายน้ำให้อยู่ในรูปที่พืชนำไปใช้ประโยชน์ได้ (วิเชียร ฝอยพิกุล, 2548 : หน้า 5)

กลุ่มจุลินทรีย์ส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช

ดินบริเวณรากพืช (Rhizosphere) เป็นแหล่งที่มีความหลากหลายของชนิดสิ่งมีชีวิตที่ว่องไวต่อกิจกรรมเมแทบอลิซึมในดิน เช่น แบคทีเรียที่อยู่เป็นอิสระบริเวณรากพืช เชื้อรา แมลงและไส้เดือนฝอยที่กินใบและรากพืช โดยทั่วไป ความหลากหลายทางชีวภาพและกิจกรรมทางชีววิทยาของสิ่งมีชีวิตบริเวณรากพืชมีความแตกต่างกันไป โดยมีกิจกรรมทางชีววิทยาสูงมากบริเวณพื้นผิวรากที่ระยะประมาณ 2 มิลลิเมตร (Mendes et al., 2013 cited in Mhatre, P. H., 2019 : p.120) รากพืชมีบทบาทสำคัญต่อความหลากหลายและกิจกรรมทางชีววิทยาในดินบริเวณราก โดยการเป็นแหล่งอาศัยและให้น้ำและสารอาหารแก่สิ่งมีชีวิตบริเวณโดยรอบ ยิ่งกว่านั้นรากพืชยังปลดปล่อยสารประกอบหลากหลายชนิด เช่น กรดอะมิโน กรดอินทรีย์ โอลิโกแซ็กคาไรด์ น้ำตาล วิตามิน นิวคลีโอไทด์ ฟลาโวนอยด์ เอนไซม์ ฮอร์โมน สารระเหย สารฟีนอลิก สารเมือก คาร์โบไฮเดรต และสารเมแทบอไลต์ทุติยภูมิ (Secondary metabolites) ชนิดต่าง ๆ ซึ่งมีผลเพิ่มกิจกรรมทางชีวภาพบริเวณรากพืช (Rohrbacher & St-Arnaud, 2016 cited in Mhatre, P. H., 2019 : p.120)

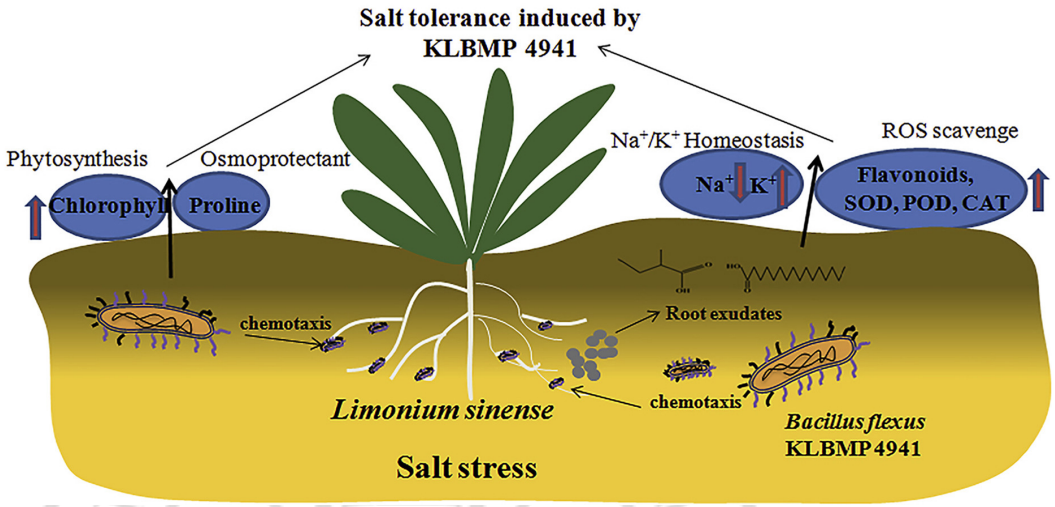
จุลินทรีย์กลุ่มส่งเสริมการเจริญของพืชหรือพีจีพีอาร์ (Plant Growth Promoting Rhizobacteria; PGPR) เป็นจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่บริเวณรอบ ๆ ราก และภายในเนื้อเยื่อพืช โดยมีบทบาทด้านการส่งเสริมการเจริญเติบโต เช่น การผลิตฮอร์โมนพืช การปรับปรุงโครงสร้างของดิน ยับยั้งเชื้อก่อโรคพืช และช่วยให้พืชใช้สารอาหารในดินได้ดีขึ้น นอกจากนี้พีจีพีอาร์ยังช่วยให้พืชปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมได้ เนื่องจากการเจริญเติบโตของพืชมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องหลายประการทั้งทางกายภาพและชีวภาพ เช่น แสง อุณหภูมิ ปริมาณน้ำ และธาตุอาหาร เป็นต้น เมื่อพืชขาดปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโต โดยทำให้พืชเจริญได้ช้า คุณภาพและปริมาณของผลผลิตตกต่ำ นอกจากนี้แมลงศัตรูพืชเป็นอีกปัญหาหนึ่งที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อพืช วิธีการแก้ปัญหานี้เกษตรกรส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นการใช้ปุ๋ยเคมีและสารเคมีในการเพิ่มผลผลิต รวมทั้งการกำจัดศัตรูพืช ซึ่งทำให้เกิดผลเสีย คือ สิ่งแวดล้อมเป็นพิษ เกิดสารพิษตกค้างจากยาฆ่าแมลง เป็นอันตรายต่อผู้บริโภค แนวทางหนึ่งในการแก้ปัญหาคือการใช้จุลินทรีย์ที่สามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช โดยเฉพาะแบคทีเรีย เนื่องจากมีหลากหลายสายพันธุ์ที่เป็นประโยชน์ต่อพืช และ

ไม่ส่งผลเสียต่อธรรมชาติ สัตว์ และมนุษย์ นอกจากนี้จุลินทรีย์บางชนิดสามารถผลิตสารระเหย และเอนไซม์ต่าง ๆ ที่ช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชได้ (Kumari et al., 2019, pp. 1-2)

ปฏิสัมพันธ์ระหว่างรากพืชและจุลินทรีย์

กลไกในการทำงานของจุลินทรีย์พีจีพีอาร์ในการเข้าสู่ระบบรากพืชจะเริ่มจากแบคทีเรียมีการส่งสัญญาณที่อยู่ในรูปของสารอินทรีย์ เช่น กลุ่ม*เอ็น*-อะซีทิล-โฮโมเซอรีน แล็กโตน (*N-acetyl*-homoserine lactone) ในระบบของการใช้สารอินทรีย์เป็นสัญญาณสื่อสารระหว่างเซลล์ของแบคทีเรียด้วยกันเอง เรียกว่า “ควอรัมเซ็นซิ่ง (Quorum sensing)” โดยสารนี้จะเข้าไปกระตุ้นการทำงานและการแสดงออกของยีนที่สำคัญ หลังจากนั้นแบคทีเรียจะมีการรวมกลุ่มกันแล้วเคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณผิวรากพืช ซึ่งจะมีกลไกในการเข้าไปคล้ายกับการสร้างไบโอฟิล์มในสิ่งแวดล้อม ซึ่งพืชจะมีการตอบสนองที่จำเพาะกับสารที่จุลินทรีย์พีจีพีอาร์ปลดปล่อยออกมา (Root exudates) พีจีพีอาร์จะเข้าไปอาศัยอยู่ภายในเนื้อเยื่อพืชผ่านราก โดยเคลื่อนที่เข้าหาสารอาหารที่รากพืชขับออกมา เช่น ฟลาโวนอยด์ (Flavonoid) คาร์โบไฮเดรต กรดอินทรีย์ และกรดอะมิโน นอกจากนี้พีจีพีอาร์สามารถผลิตเอนไซม์ต่าง ๆ เช่น เซลลูเลสและเพคติเนส (Pectinase) ซึ่งจุลินทรีย์ปล่อยออกมาทำลายผนังเซลล์ของพืชเพื่อช่วยในการเข้ายึดเกาะกับเซลล์พืช เอนโดกลูคาเนส (Endoglucanase) กลูตาไธโอนรีดักเทส (Glutathione reductase) และซูเปอร์ออกไซด์ ดิสมิวเทส (Superoxide Dismutase) มีคุณสมบัติในการลดปฏิกิริยาจากที่ทำให้เซลล์เสียหายเมื่อพืชอยู่ในสภาวะเครียด (Oxidative stress) (ธนากร แสงสง่า, 2557 : หน้า 555-562) สอดคล้องกับรายงานของ Xiong และคนอื่น ๆ (2020) ที่พบว่ากรดอินทรีย์หลายชนิดที่ปลดปล่อยออกมาทางรากของไม้ดอกล้มลุกสแตสิส (*Limonium sinense*) ภายใต้ภาวะเครียดจากความเค็ม (Salt stress) สามารถชักนำให้แบคทีเรียพีจีพีอาร์ *Bacillus flexus* KLBMP 4941 เคลื่อนที่เข้าหาบริเวณปลายราก (Chemotaxis) โดย *B. flexus* KLBMP 4941 ได้สารอาหารสำหรับการเจริญและมีบทบาทส่งเสริมการเจริญของ *L. sinense* จากผลการวิจัยพบว่ากรดอินทรีย์เหล่านี้ได้แก่ 2-เมทธิลบิวทีริก แอซิด (2-methylbutyric acid) สเตียริก แอซิด (Stearic acid) พาลมิติก แอซิด (Palmitic acid) พาลมิโตเลอิก แอซิด (Palmitoleic acid) และโอเลอิก แอซิด (Oleic acid) (Xiong, Y. -W. et al. 2020 : p. 1) ดังแสดงในภาพที่ 2.1

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์



ภาพที่ 2.1 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างพีจีพีอาร์กับรากพืช
ที่มา : Xiong, Y. -W. et al., 2020 : p. 6

กลุ่มของพีจีพีอาร์

Gupta และคนอื่น ๆ (2015) แบ่งพีจีพีอาร์เป็น 2 กลุ่ม คือ ePGPR (Extracellular plant growth promoting rhizobacteria) และ iPGPR (Intracellular plant growth promoting rhizobacteria) โดยแต่ละกลุ่มมีลักษณะสำคัญดังนี้

1. พีจีพีอาร์กลุ่ม ePGPR

พบได้ในดินบริเวณรากพืช (Rhizosphere) บริเวณพื้นผิวของรากพืช (Rhizoplane) หรือในช่องว่างระหว่างเซลล์ชั้นคอร์เท็กซ์ของราก (Root cortex) ยกตัวอย่างเช่น แบคทีเรียในจีนัส *Agrobacterium, Arthrobacter, Azotobacter, Azosprillum, Bacillus, Caulobacter, Erwinia, Micrococcus, Pseudomonas, Serratia, Burkholderia, Chromobacterium, Flovobacterium*

2. พีจีพีอาร์กลุ่ม iPGPR

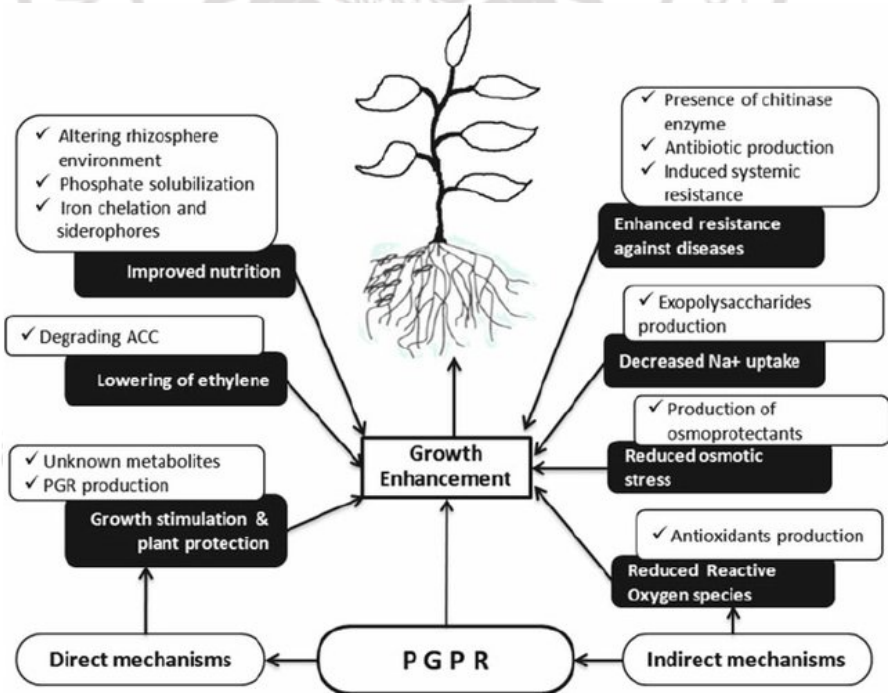
พบได้ภายในโครงสร้างพิเศษส่วนปมของเซลล์ราก เป็นแบคทีเรียในวงศ์ Rhizobiaceae รวมถึง *Allorhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Mesorhizobium* และ *Rhizobium* นอกจากนี้ยังมีกลุ่มของเอนโดไฟต์ (Endophyte) และ *Frankia* ซึ่งสามารถตรึงไนโตรเจนจากบรรยากาศแบบพึ่งพาอาศัยกับพืชชั้นสูงได้

กลไกการส่งเสริมการเจริญของพืชโดยพีจีพีอาร์

Nadeem และคนอื่น ๆ (2013) รายงานว่ากลไกส่งเสริมการเจริญของพืชโดยพีจีพีอาร์เป็นปรากฏการณ์ที่แพร่หลาย ซึ่งเป็นกิจกรรมของกลุ่มของแบคทีเรียบริเวณรากพืช (Rhizobacteria)

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

บางลักษณะพบได้ในแบคทีเรียทั่วไป แต่บางลักษณะพบได้ในแบคทีเรียเฉพาะกลุ่ม กลไกหลัก ๆ ในการส่งเสริมการเจริญของพืชโดยพีจีพีอาร์แบ่งได้เป็น 2 กลไก คือ ทางตรง (Direct mechanisms) และทางอ้อม (Indirect mechanisms) ดังแสดงในภาพที่ 2.2 กลไกทางตรงมีผลในการเพิ่มสารอาหารแก่พืช (Improved nutrition) ประกอบด้วย การเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมบริเวณรากพืช (Altering rhizosphere environment) การละลายฟอสเฟต (Phosphate solubilization) การผลิตสารที่จับธาตุเหล็กและไซเดอโรฟอร์ (Iron chelation and siderophores) นอกจากนี้กลไกทางตรงยังมีผลในการลดระดับเอทิลีน (Lowering of ethylene) โดยการย่อยสลาย ACC (Degrading ACC) และยังมีผลในการกระตุ้นการเจริญและป้องกันพืช (Growth stimulation & plant protection) โดยการผลิตสารมัธยันตร์ที่ไม่ทราบชนิด (Unknown metabolites) สำหรับกลไกทางอ้อมในการส่งเสริมการเจริญของพืช ประกอบด้วย การเพิ่มความต้านทานต่อโรคพืช (Enhanced resistance against disease) โดยการผลิตเอนไซม์ไคติเนส (Chitinase) สารปฏิชีวนะ และชักนำให้เกิดระบบต้านทานในพืช (Induced systemic resistance) ลดการดูดซึมโซเดียมไอออน (Decreased Na^+ uptake) ด้วยการผลิตเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ (Exopolysaccharide) ลดแรงดันออสโมติกโดยการผลิตสารที่ทำหน้าที่ในการรักษาสมดุลของน้ำและแรงดันออสโมติกภายในเซลล์กับสิ่งแวดล้อม (Osmoprotectants) และการลดสารอนุมูลอิสระ (Reactive oxygen species) (Nadeem, S. M. et al. 2013 : pp. 53-54.)



ภาพที่ 2.2 กลไกในการส่งเสริมการเจริญของพืชโดยพีจีพีอาร์

ที่มา : Nadeem, S. M. et al., 2013 : p. 54

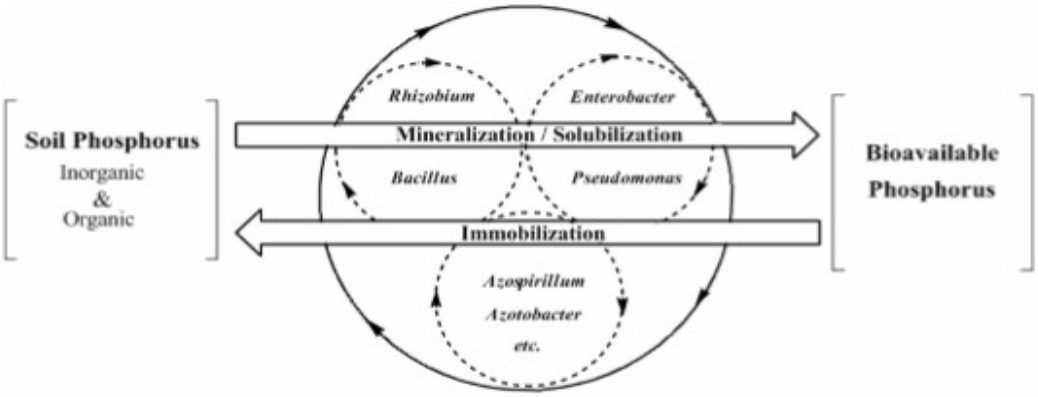
กลุ่มจุลินทรีย์พีจีพีอาร์ที่ละลายฟอสเฟต

การใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัสปริมาณมากเพื่อเพิ่มผลผลิตทางการเกษตรให้เพียงพอต่อความต้องการอาหารของประชากรทั่วโลก ทำให้เกิดมลพิษต่อน้ำผิวดินและน้ำใต้ดิน แหล่งน้ำสะสมธาตุอาหารที่กระตุ้นให้พืชบางประเภท เช่น สาหร่ายและวัชพืชในน้ำเจริญมากกว่าปรกติ (Waterway eutrophication) การขาดความอุดมสมบูรณ์ของดิน การสะสมธาตุที่เป็นพิษ เช่น ซิลีเนียม (Selenium; Se) อาร์ซีนิก (Arsenic; Ar) มีจุลินทรีย์ในดินที่สามารถละลาย/ย่อยสลาย (Solubilizing/Mineralizing) ฟอสเฟตได้ (Phosphate Solubilizing Microorganisms; PSM) และทำให้ฟอสเฟตอยู่ในรูปที่พืชนำไปใช้ประโยชน์ได้ จุลชีพกลุ่มนี้เพิ่มการเจริญและปริมาณผลผลิตของพืชหลายชนิด ดังนั้นการลงเชื้อ PSM พร้อมกับเมล็ดพืชหรือในดิน จะเป็นการช่วยเพิ่มปริมาณการผลิตอาหารทั่วโลก โดยที่ไม่ก่อให้เกิดปัญหาสารพิษในสิ่งแวดล้อม (Alori, Glick & Babalola, 2017 : p. 1) ซึ่งมีจุลินทรีย์ดินหลายชนิดสมารถเพิ่มสารอาหารที่เป็นประโยชน์ให้กับพืช โดยสามารถละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตและย่อยสลายสารอินทรีย์ฟอสเฟตที่ไม่ละลายน้ำ

กลไกการละลายฟอสเฟต

จุลินทรีย์ดินเป็นปัจจัยสำคัญต่อการนำธาตุฟอสฟอรัสในดินไปใช้ในพืช เนื่องจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ในกระบวนการต่าง ๆ (ภาพที่ 2.3) ได้แก่ การย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ฟอสเฟตด้วยเอนไซม์ (Mineralization) ตัวอย่างของจุลินทรีย์กลุ่มนี้ เช่น *Rhizobium* และ *Bacillus* และการตรึงฟอสฟอรัส (Immobilization) โดยการดูดซึมเข้าสู่เซลล์ ตัวอย่างของจุลินทรีย์กลุ่มนี้ เช่น *Azospililum* และ *Azotobacter* และการละลายสารประกอบอนินทรีย์ฟอสเฟตด้วยกรดอินทรีย์ (Solubilization) ตัวอย่างของจุลินทรีย์กลุ่มนี้ เช่น *Enterobacter* และ *Pseudomonas* สามารถละลายไตรแคลเซียม อลูมิเนียม และเหล็กฟอสเฟต ทำให้เกิดการปลดปล่อยอนินทรีย์และอินทรีย์ฟอสเฟตในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืช ซึ่งแบคทีเรียและรามีบทบาทที่สำคัญในการเปลี่ยนรูปของสารประกอบฟอสเฟตที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ โดยทั่วไปรามีความสามารถในการละลายฟอสเฟตสูงกว่าจุลินทรีย์ชนิดอื่น (Sharma, Vijay & Tripathi, 2011 : p.91)

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี



ภาพที่ 2.3 กลไกการละลายฟอสฟอรัสของจุลินทรีย์
ที่มา : Sharma, Vijay & Tripathi, 2011 : p.92

กิจกรรมของจุลินทรีย์ทำให้เกิดการละลายฟอสเฟตโดยการสร้างกรดแล้วปลดปล่อยฟอสฟอรัสให้อยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืช สำหรับชนิดของกรดที่จุลินทรีย์สร้างขึ้นมีทั้งกรดอินทรีย์และกรดอนินทรีย์ โดยชนิดของกรดอินทรีย์ที่จุลินทรีย์สร้างและปลดปล่อยออกมา เช่น กรดกลูโคนิก (Gluconic acid; GA) กรด 2 แอลฟา - คีโตกลูโคนิก (2α - Ketogluconic acid; 2-KGA) กรดแลคติก (Lactic acid; LA) กรดซักซินิก (Succinic acid; SA) กรดฟอร์มิก (Formic acid; FA), กรดมาลิก (Malic acid; MA) กรดซิตริก (Citric acid; CA) กรดออกซาลิก (Oxalic acid; OA) กรดฟูมาริก (Fumalic acid; FuA) กรดทาร์ทาริก (Tartaric acid; TA) กรดโพรพิโอนิก (Propionic acid; PA) กรดอะซิติก (Acetic acid; AA) กรดไอโซบิวทีริก (Isobutyric acid; IBA) กรดไอโซ-วาลานิก (Isovaleric acid; IVA) กรดวาลาริก (Valeric acid; VA) และกรดไอโซคาโพรอิก (Isocaproic acid; ISA) (ตารางที่ 2.1) นอกจากนี้ยังมีกลุ่มจุลินทรีย์บางชนิดที่มีการสร้างสารมาจับ (Chelate) กับแคลเซียมและเหล็กทำให้เกิดการละลายของฟอสเฟต สำหรับชนิดของกรดอนินทรีย์ที่สร้างจากแบคทีเรีย PSB เช่น กรดไนตริก (Nitric acid) และกรดซัลฟูริก (Sulfuric acid) เกิดจากกิจกรรมของ *Nitrobacter* และ *Thiobacillus* โดยกรดที่สร้างขึ้นมาจะส่งผลให้ค่าพีเอชลดลง ซึ่งทำให้ฟอสเฟตสามารถเกิดการละลายได้มากขึ้นในธรรมชาติ (ธงชัย มาลา, 2546; Alori, Glick & Babalola, 2017 : p.2)

ตารางที่ 2.1 ชนิดของกรดอินทรีย์ที่ผลิตโดยแบคทีเรีย PSB

แบคทีเรีย PSB	ชนิดของกรดอินทรีย์
Enterobacter sp. Fs-11	MA, GA
Pseudomonas trivialis (BIHB 769)	GA, 2-KGA, LA, SA, FA, MA

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

แบคทีเรีย PSB	ชนิดของกรดอินทรีย์
Pseudomonas poae (BIHB 808)	GA, 2-KGA, SA, CA, MA
Pseudomonas spp. (BIHB 751)	OA, GA, 2-KGA, FA, MA
Enterobacter Hy-401	OA, GA, MA, LA, CA, SA, FuA
Arthrobacter Hy-505	OA, GA, LA, CA
Azotobacter Hy-510	OA, GA, TA, LA, SA, FuA
Enterobacter Hy-402	OA, GA, TA, LA, SA, FuA
Rhodococcus erythropolis (CC-BC11)	GA
Bacillus megaterium (CC-BC10)	CA, LA, PA
Arthrobacter sp. (CC-BC03)	CA, LA
Arthrobacter ureafaciens (CC-BC02)	CA
Serratia marcescens (CC-BC14)	CA, GA, SA, LA
Delftia (CC-BC21)	SA
Chryseobacterium (CC-BC05)	CA
Phyllobacterium myrsinacearum (CC-BC19)	GA

ที่มา : Khan, Zaidi & Ahmad, 2014 : p. 35

จุลินทรีย์ละลายฟอสเฟต

จุลินทรีย์ละลายฟอสเฟต ได้แก่ แบคทีเรีย รา และแอคติโนมัยซีทชนิดต่าง ๆ ที่มีความสามารถในการละลายแร่ธาตุฟอสฟอรัสในรูปสารประกอบอนินทรีย์ที่ถูกตรึงในดินให้อยู่ในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (ธงชัย มาลา, 2546 : หน้า 5) จัดเป็นแนวทางหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ฟอสเฟตของพืช โดยตัวอย่างจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการละลายฟอสเฟตแสดงดังข้อมูลในตารางที่ 2.2

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

ตารางที่ 2.2 จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการละลายฟอสเฟต

กลุ่มจุลินทรีย์	จุลินทรีย์ละลายฟอสเฟต
แบคทีเรีย	*Alcaligenes* spp., *Achromobacter* spp., *Aerobactor aerogenes.*, *Actinomadura oligospora, Agrobacterium* spp., *Azospirillium brasilense, Azotobacter, Bacillus* sp., *B. cereus, B. fusiformis, B. pumils, B. megaterium, B. mycoides, B. polymyxa, B. coagulans, B. chitinolyticus, B. pulvifaciens, B. megaterium, B. circulans, B. subtilis, B. mesentericus, B. fluorescens, Bradyrhizobium* sp., *Brevibacterium* sp., *Burkholderia, Enterobacter, Kushneria, Paenibacillus, Ralstonia, Rhizobium, Rhodococcus, Serratia, Bradyrhizobium, Salmonella, Sinomonas, Citrobacter* sp., *Pseudomonas* sp., *Ps. putida, Ps. liquifaciens, Ps. calcis, Ps. rathoria, Escherichia freundii, E. intermedia, Xanthomonas* spp., *Flavobacterium* spp., *Brevibacterium* spp., *Serretia* spp., *Erwinia* spp., *Nitrosomonas* spp., *Thiobacillus thiooxidans*
เชื้อรา	*Aspergillus* sp., *A. niger, A. flavus, A. fumigatus, A. terreus, A. awamori, Achrothcium, Alternaria, Arthrobotrys, Penicillium lilacinum, P. digitatum, Cephalosporium, Cladosporium, Curvularia, Cunninghamella, Chaetomium, Glomus, Helminthosporium, Micromonospora, Mortierella, Myrothecium, Oidiodendron, Paecilomyces, Phoma, Pichia fermentans, Populospora, Pythium, Rhizoctonia, Rhizopus, Saccharomyces, Schizosaccharomyces, Schwanniomyces, Sclerotium, Torula, Trichoderma, Yarrowia, Fusarium, F. oxysporum, Curvularia lunata, Humicola, Sclerotium rolfsii, Pytium, Aerothecium, Rhodotorula, Candida , Schwanniomyces occidentalis, Pseudonymnoascus*
แอคติโนมัยซีท	*Streptomyces* sp., *Nocardia* sp.
ไซยาโนแบคทีเรีย	*Anabena* sp., *Calothrix braunii., Nostoc* sp., *Scytonema* sp.,

ที่มา : ธงชัย มาลา, 2546; Sharma, Vijay & Tripathi, 2013; Alori, Glick & Babalola, 2017

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

มีรายงานว่าราดินบางชนิดสามารถเคลื่อนที่เป็นระยะทางไกลในดินได้ง่ายกว่าแบคทีเรีย จึงอาจมีความสำคัญในการละลายอนินทรีย์ฟอสเฟตในดิน เพราะสามารถผลิตและปลดปล่อยกรดได้สูงกว่าแบคทีเรีย ยกตัวอย่าง เช่น กรดกลูโคนิก ซิตริก แล็กติก 2-คีโตกลูโคนิก ออกซาลิก ทาร์ทาริก และแอซีติก นอกจากนี้พบว่าประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ของแอคติโนมัยสีทในดินสามารถละลายฟอสเฟตได้ เช่น *Actinomyces*, *Micromonospora* และ *Streptomyces* รวมทั้งมีรายงานว่าไซยาโนแบคทีเรียมีกิจกรรมในการละลายฟอสเฟตเช่นเดียวกัน (Alori, Glick & Babalola, 2017 : p.2)

ภาวนา ลิกขนานนท์ (ม.ป.ป.) รายงานการคัดแยกจุลินทรีย์ละลายฟอสเฟตจากแหล่งต่าง ๆ จำนวน 300 ไอโซเลท พบว่าส่วนใหญ่เป็นแบคทีเรียและรา เมื่อนำไปใช้กับพืชพบว่าราที่คัดเลือกไว้มีประสิทธิภาพในการละลายหินฟอสเฟตได้มากกว่าแบคทีเรีย จึงนำ *Penicillium* spp. RPS 003 F มาทดลองผลิตเป็นหัวเชื้อจุลินทรีย์ละลายฟอสเฟตในระดับห้องปฏิบัติการ (ภาพที่ 2.4) ผลการทดลองพบว่า เมื่อใส่รา RPS 003 F ในชุดทดสอบ เชื้อราไอโซเลทดังกล่าวสามารถปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ออกมาได้ 12 – 18 มิลลิกรัม/กิโลกรัม จากหินฟอสเฟตหนัก 0.50 กรัม ขณะที่ในชุดการทดสอบที่ไม่ใส่รามีการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสออกมาได้เพียง 0.30 – 0.52 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ในระยะเวลา 7 วัน หลังจากนั้นนำ *Penicillium* spp. RPS 003 F มาทดลองใช้กับพืชทดสอบ คือ ข้าวโพดและถั่วเหลือง ผลการทดลองพบว่าข้าวโพดและถั่วเหลืองที่เพาะในกระถางที่มีการเติมหัวเชื้อจุลินทรีย์ละลายฟอสเฟต ให้ผลผลิตเพิ่มขึ้น 97.3 เปอร์เซ็นต์ และ 71.6 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ลิขสิทธิ์ข[illegible]เรรณี

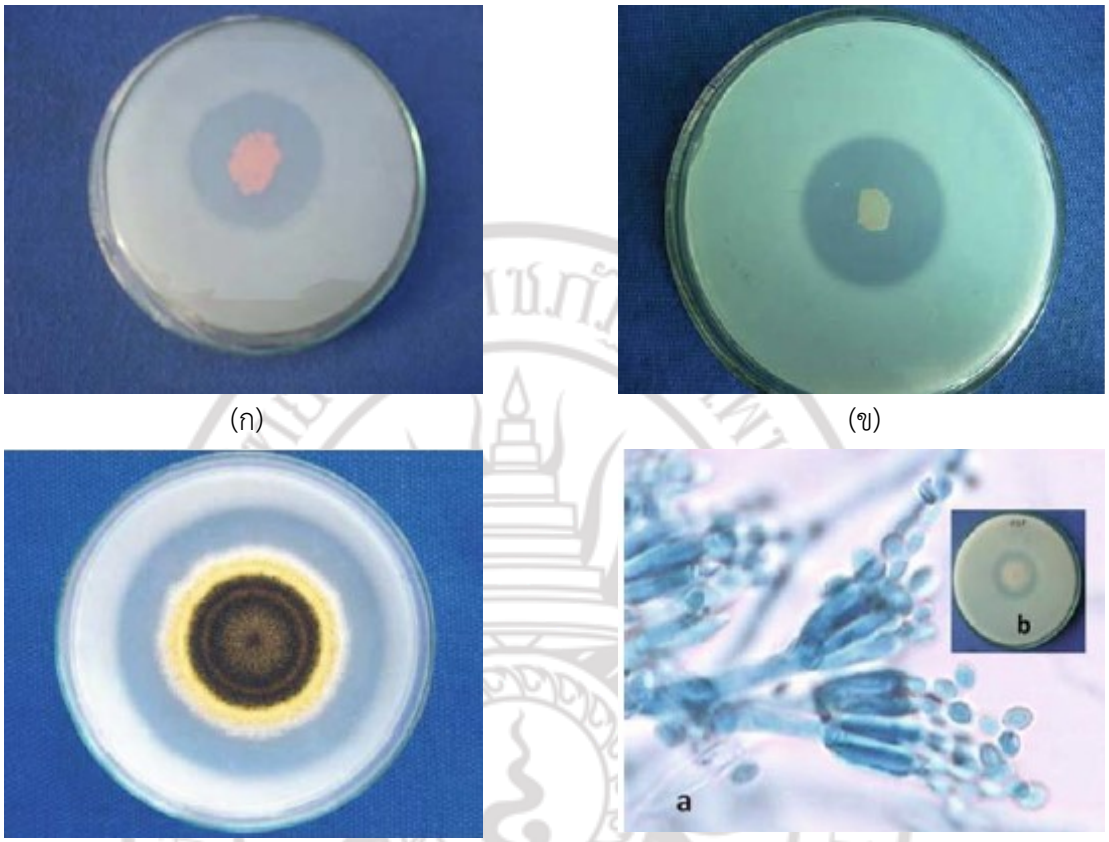
ภาพที่ 2.4 ตัวอย่างหัวเชื้อจุลินทรีย์ละลายฟอสเฟต PS1 เป็นรา *Penicillium* spp. สายพันธุ์ที่มีประสิทธิภาพในการสร้างสารปลดปล่อยออกมาละลายฟอสเฟต

ที่มา: ภาวนา ลิกขนานนท์, ม.ป.ป.

แบคทีเรียละลายฟอสเฟต

แบคทีเรียละลายฟอสเฟต (Phosphate Solubilizing Bacteria; PSB) หรือ พีเอสบี เป็นกลุ่มแบคทีเรียพีจีพีอาร์ที่สามารถย่อยสลายอนินทรีย์ฟอสเฟตที่ไม่ละลายน้ำ เช่น ไตรแคลเซียมฟอสเฟต (Tricalcium phosphate) ไดแคลเซียมฟอสเฟต (Dicalcium phosphate) และหินฟอสเฟตให้อยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ โดยจะแสดงวงใส (Clear zone) บนอาหารคัดเลือก Pikovskaya (ภาพที่ 2.5) สอดคล้องกับรายงานของ Reena และคณะ (2013) ที่คัดแยกแบคทีเรีย PSB และราละลายฟอสเฟตจากดินรากกล้วยโดยศึกษาจากการสร้างวงใสรอบโคโลนีซึ่งแสดงถึงความสามารถในการละลายฟอสเฟตของเชื้อทดสอบที่ถูกเพาะเลี้ยงบนอาหารคัดเลือก ผลการทดลองพบว่า *Aspergillus* sp. สามารถละลายฟอสเฟตได้มากที่สุดโดยสร้างวงใส 234.12 มิลลิเมตร รองลงมาคือ *Bacillus subtilis* 160.82 มิลลิเมตร *Pseudomonas aeruginosa* 126.11 มิลลิเมตร *Penicillium* sp. 99.02 มิลลิเมตร และ *Micrococcus sp.* 89.4 มิลลิเมตร ตามลำดับ นอกจากนี้ Karpagam และ Nagalakshmi (2014) ได้คัดเลือกเชื้อจำนวน 8 ไอโซเลท ที่มีค่าดัชนีการละลายฟอสเฟตสูงที่สุดอยู่ในช่วง 1.13 – 2.23 มาทดสอบคุณสมบัติในการละลายฟอสเฟตในอาหารเหลว พบว่าจุลินทรีย์ไอโซเลท psm1, psm2 และ psm3 มีประสิทธิภาพการละลายฟอสเฟตสูงที่สุดเท่ากับ 0.37, 0.30 และ 0.28 มิลลิลิตร/ลิตร ตามลำดับ

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

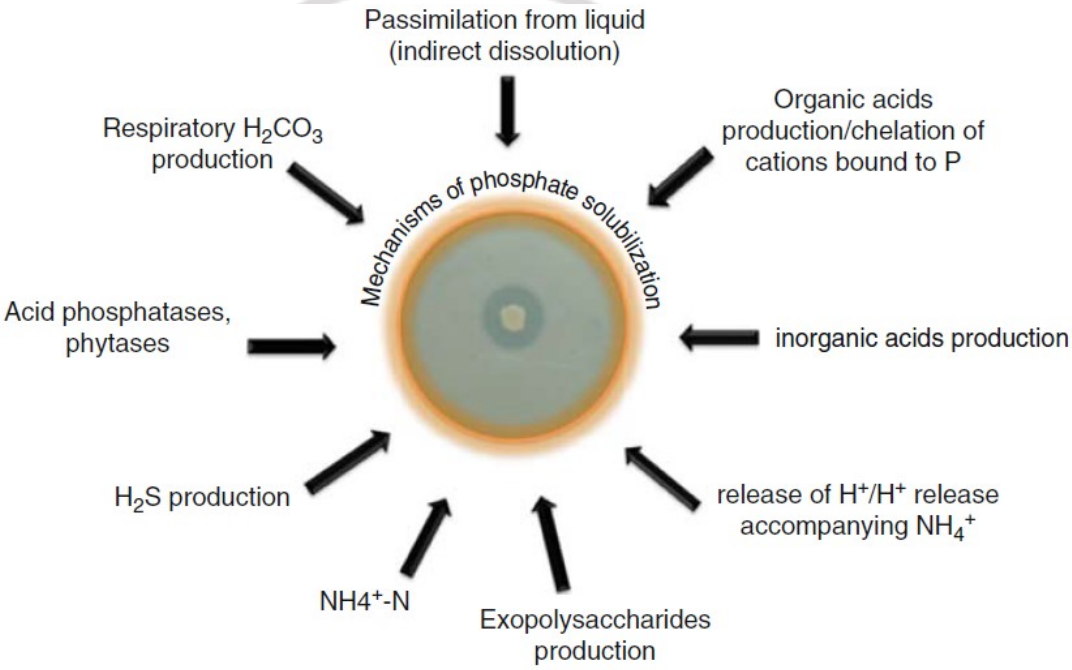


ภาพที่ 2.5 การละลายไตรแคลเซียมฟอสเฟตบนผิวหน้าอาหาร Pikovskaya ของ (ก) *Serratia* (ข) *Bacillus* (ค) *Aspergillus* (ง) *Penicillium*

ที่มา : Khan, M. S. et al., 2009 : p. 26

Panhwar และคนอื่น ๆ (2012) รายงานการคัดแยกและศึกษาคุณสมบัติของแบคทีเรียที่ละลายฟอสเฟตจากพื้นที่นาข้าวน้ำน้อยในรัฐปีนัง ประเทศมาเลเซีย โดยทำการเพาะเลี้ยงบนอาหารหลายชนิด ได้แก่ *Pseudomonas aeruginosa* (PA), NBRIP, Pikovskaya และ *Pseudomonas* spp. โดยพบว่าอาหาร Pikovskaya มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการคัดแยกแบคทีเรียละลายฟอสเฟต แบคทีเรียที่ทำการคัดแยกได้ส่วนใหญ่เป็น *Bacillus* spp. หลังจากนั้นนำมาศึกษาสมบัติทางชีวภาพ ได้แก่ การสร้างกรดอินทรีย์โดยการวิเคราะห์ด้วย HPLC พบว่าแบคทีเรียละลายฟอสเฟตสามารถผลิตกรดซักซินิก กรดออกซาลิก กรดมาลิก และกรดโพรพิโอนิกออกมา รวมทั้งผลิตเอนไซม์ฟอสฟาเทสและไฟเทสช่วยในการละลายฟอสเฟต นอกจากนี้เชื้อดังกล่าวยังสามารถผลิตฮอร์โมนกลุ่มที่มีประโยชน์ต่อพืชออกมา เช่น อินโดลอะซีติกแอซิด (Indoleacetic acid , IAA) ไซเดอโรฟอร์ และพบว่า *Bacillus* sp. สามารถยับยั้งเชื้อรา *Rhizoctonia solani* ที่เป็นราก่อโรคในนาข้าว (Panhwar Q. A. et al., 2012 : p. 2711)

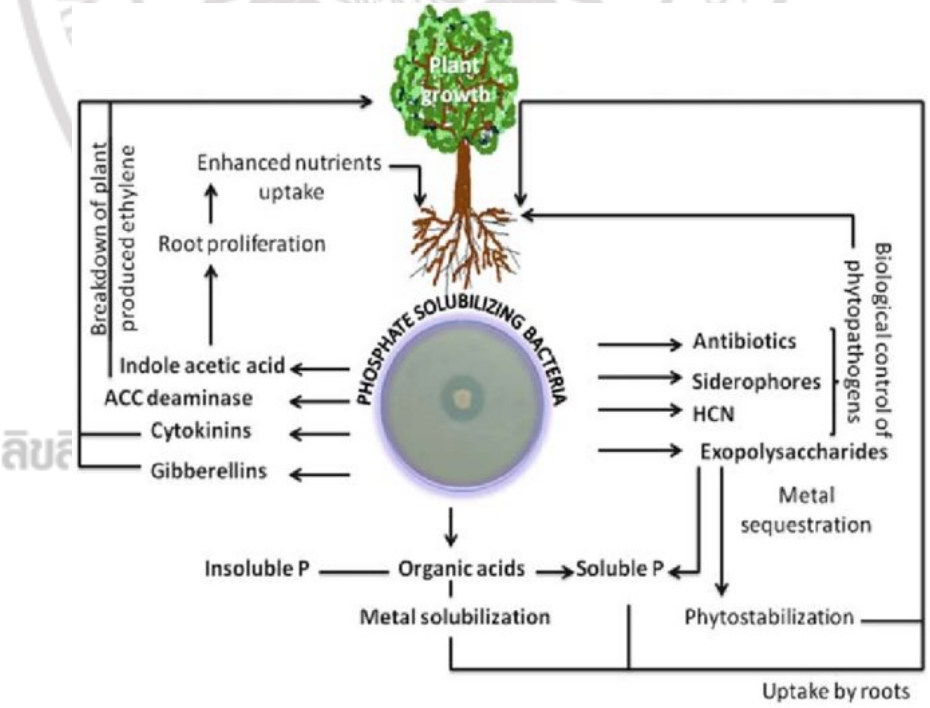
กลไกการละลายฟอสเฟตของแบคทีเรีย PSB ประกอบด้วยการผลิตกรดอินทรีย์ กรดอนินทรีย์ การปล่อย H^+/H^+ และ NH_4^+ การผลิตเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ การสร้าง NH_4^+-N การผลิตไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) การผลิตกรดฟอสฟาเฟส (Acid phosphatases) และไฟเทส (Phytase) ดังแสดงในภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 กลไกการละลายฟอสเฟตของแบคทีเรีย PSB
ที่มา : Khan, M. S. et al., 2009 : p. 29

กลไกการละลายฟอสเฟตของแบคทีเรีย PSB อาจเกิดจากการผลิตเอนไซม์ฟอสฟาเทส หรือกรดอินทรีย์โมเลกุลเล็ก ๆ จากกระบวนการเมแทบอลิซึมเพื่อใช้ในการย่อยสลายฟอสเฟตในรูปที่ไม่ละลายน้ำให้อยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ สำหรับชนิดของกรดอินทรีย์ที่จุลินทรีย์สร้างและปลดปล่อยออกมา เช่น กรดฟอร์มิก กรดแอซีติก กรดโพรพิโอนิก กรดแลกติก กรดฟูมาริก และกรดซักซินิก นอกจากนี้ยังมีจุลินทรีย์บางชนิดที่มีการสร้างสารมาจับกับแคลเซียมและเหล็ก ทำให้เกิดการละลายของฟอสเฟต โดยทั่วไปเชื้อรามีความสามารถในการละลายฟอสเฟตสูงกว่าจุลินทรีย์ชนิดอื่น สำหรับชนิดของกรดอนินทรีย์ที่สร้างจากแบคทีเรีย PSB เช่น กรดไนตริก (Nitric acid) และกรดซัลฟูริก (Sulfuric acid) จากกิจกรรมของ *Nitrobacter* และ *Thiobacillus* โดยกรดที่สร้างขึ้นมาจะส่งผลทำให้ค่าพีเอชลดลง ซึ่งทำให้ฟอสเฟตสามารถเกิดการละลายได้มากขึ้น (ธงชัย มาลา, 2546 : หน้า 10)

นอกจากนี้มีรายงานว่าแบคทีเรีย PSB หลายชนิดมีคุณสมบัติด้านอื่น ๆ ในการส่งเสริมการเจริญของพืช (PGPR traits) เช่น การสร้างกรดอินโดล อะซีติก (Indole acetic acid) ที่มีผลยืดความยาวของรากพืช การผลิต ACC deaminase ซึ่งย่อยสลายเอทิลีนที่พืชสร้างขึ้นในภาวะเครียด การผลิตไซโทไคนิน (Cytokinin) และจิบเบอเรลลิน (Gibberellins) ซึ่งเป็นฮอร์โมนพืชที่มีคุณสมบัติในการกระตุ้นการเจริญ นอกจากนี้ PSB บางสายพันธุ์มีความสามารถในการยับยั้งเชื้อก่อโรคพืช (Phytopathogens) โดยการสร้างสารปฏิชีวนะ ไซเดอโรฟอร์ (Siderophores) ไฮโดรเจนไซยาไนด์ (HCN) ดังแสดงในภาพที่ 2.7 สอดคล้องกับรายงานของกิริยา สังข์ทองวิเศษ และคนอื่น ๆ (2557) ที่คัดแยกแบคทีเรียที่มีความสามารถละลายฟอสเฟตในรูปไตรแคลเซียมฟอสเฟต เฟอร์ริกฟอสเฟต และอลูมิเนียมฟอสเฟตให้อยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์กับพืชที่ปลูกแซม และแบคทีเรียที่สามารถผลิตฮอร์โมน IAA จากดินบริเวณรากพืชของพืชแซมยางพาราชนิดต่าง ๆ โดยแบคทีเรียไอโซเลท PSB-C-08 ที่คัดแยกได้จากดินบริเวณรากหัวมันสำปะหลังมีประสิทธิภาพสูงในการละลายอะลูมิเนียมฟอสเฟตได้ 670.62 มิลลิกรัม/ลิตร รองลงมาคือแบคทีเรียไอโซเลท PSB-M-01 ที่คัดแยกจากดินบริเวณรากถั่วมูคูน่าละลายอะลูมิเนียมฟอสเฟตได้ 561.32 มิลลิกรัม/ลิตร นอกจากนี้พบว่าแบคทีเรีย PSB-Ba-02 ที่คัดแยกได้จากบริเวณที่ไม่ได้ปลูกพืชแซมรวมทั้งแบคทีเรีย PSB-M-06 และ PSB-M-10 ที่คัดแยกได้จากดินบริเวณรากถั่วมูคูน่ามีประสิทธิภาพในการผลิตฮอร์โมน IAA ได้เท่ากับ 987.83, 969.76 และ 955.30 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ



ภาพที่ 2.7 กลไกการส่งเสริมการเจริญของพืชโดยแบคทีเรีย PSB

ที่มา : Khan, M. S. et al., 2009 : p.31

ปุ๋ยชีวภาพ

ตามพระราชบัญญัติปุ๋ย (ฉบับที่ 2) พ.ศ.2550 ได้ให้คำจำกัดความของปุ๋ยชีวภาพและคำอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง ไว้ดังนี้

“ปุ๋ยชีวภาพ” หมายความว่า ปุ๋ยที่ได้จากการนำจุลินทรีย์ที่มีชีวิตที่สามารถสร้างธาตุอาหารหรือช่วยให้ธาตุอาหารเป็นประโยชน์กับพืช มาใช้ในการปรับปรุงบำรุงดินทางชีวภาพ ทางกายภาพหรือทางชีวเคมี และให้หมายความรวมถึงหัวเชื้อจุลินทรีย์

“ชนิดของจุลินทรีย์” หมายความว่า กลุ่มหรือสกุลของจุลินทรีย์เป็นภาษาทางวิทยาศาสตร์ของจุลินทรีย์

“หัวเชื้อจุลินทรีย์” หมายความว่า จุลินทรีย์ชีวภาพที่มีจำนวนเซลล์ต่อหน่วยสูงซึ่งถูกเพาะเลี้ยงโดยกรรมวิธีทางวิทยาศาสตร์

“วัสดุรองรับ” หมายความว่า สิ่งที่นำมาใช้ในการผสมกับหัวเชื้อจุลินทรีย์ในกระบวนการผลิตปุ๋ยชีวภาพ

“ปริมาณจุลินทรีย์รับรอง” หมายความว่า ปริมาณขั้นต่ำที่ผู้ผลิตหรือผู้นำเข้ารับรองถึงจำนวนเซลล์รวม หรือจำนวนสปอร์รวม หรือจำนวนตามหน่วยวัดอื่นที่รัฐมนตรีกำหนด โดยประกาศในราชกิจจานุเบกษา ของจุลินทรีย์ที่มีชีวิตที่มีอยู่ในปุ๋ยชีวภาพหรือหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ตนผลิตหรือนำเข้าแล้วแต่กรณี

รูปแบบของหัวเชื้อแบคทีเรียที่ส่งเสริมการเจริญของพืช

หัวเชื้อแบคทีเรียที่จะนำมาใช้ในการกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืชในพื้นที่เกษตรกรรมควรนำมาใช้งานได้ง่าย มีระยะเวลาในการเก็บรักษาได้ยาวนาน สามารถใช้ได้กับดินหลากหลายประเภทและในสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกันไป (Bashan et al., 2013 : p.4) โดยสูตรของหัวเชื้อควรจะเป็นรูปแบบที่ง่ายต่อการผลิตและการใช้งาน เมื่อไปถึงมือผู้ใช้ที่เป็นเป้าหมาย โดยสามารถผลิตออกมาได้ทั้งในรูปแบบสูตรแข็งและสูตรน้ำ

หัวเชื้อแบคทีเรียสูตรแข็ง

สถาบันวิทยบริการมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

การผลิตหัวเชื้อแบคทีเรียสูตรแข็ง สามารถใช้วัสดุที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ผลิตออกมาในรูปแบบของเม็ด ผง เม็ด หรือใช้การละลายในน้ำ จากรายงานของ ณัฏฐิมา โฆษิตเจริญกุล และคนอื่น ๆ (2556) ได้มีการพัฒนารูปแบบผลิตภัณฑ์ชนิดผง *Bacillus subtilis* สายพันธุ์ 4415 และสายพันธุ์ดินอ้อย no.6 เพื่อควบคุมโรคเหี่ยวของข้าวปทุมมา โดยการเตรียมผลิตภัณฑ์ชนิดผง *Bacillus subtilis* สายพันธุ์ 4415 และอ้อย no.6 โดยการเพาะเลี้ยงแบคทีเรีย *B. subtilis* สายพันธุ์ 4415 และอ้อย no.6 เพื่อเพิ่มปริมาณ ทำการเลี้ยงในอาหารเหลว NGB และอาหารแข็ง NGA

นำแบคทีเรียที่เพิ่มปริมาณได้ไปทำเป็นผงเชื้อโดยใช้ผงทัลคัม (Talcum) เป็นวัสดุรองรับ ผลิตผงเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* สายพันธุ์ 4415 และอ้อย no.6 จำนวน 2 กิโลกรัม ทดสอบอายุของการเก็บรักษาผงเชื้อ นำมาตรวจหาเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* สายพันธุ์ 4415 และอ้อย no.6 ในผงเชื้อทุกเดือนเพื่อตรวจสอบความอยู่รอดและปริมาณ ทดสอบอายุของการเก็บรักษาผงเชื้อเป็นเวลา 15 เดือน พบว่าผงเชื้อมีอายุการเก็บรักษาที่ยังคงมีปริมาณแบคทีเรีย *B. subtilis* สายพันธุ์ 4415 และอ้อย no.6 ในผงเชื้อ มีปริมาณ $1x10^{10}$ เซลล์ต่อกรัม ที่ 12 เดือน นอกจากนี้ ปิยรัตน์ ธรรมกิจวัฒน์ และคนอื่น ๆ (ม.ป.ป.) ได้คัดเลือกแบคทีเรียปฏิปักษ์ที่มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียสาเหตุโรคใบไหม้หน้าวัวมาพัฒนาเป็นชีวภัณฑ์รูปผงอัดเม็ดฟู่ โดยผสมเซลล์แบคทีเรียปฏิปักษ์แล้วอัดเป็นเม็ดสี่เหลี่ยม น้ำหนักเม็ดละประมาณ 4 กรัม พบว่าชีวภัณฑ์ผงอัดเม็ดฟู่ที่ได้สามารถแตกตัวในน้ำได้ดีภายใน 1 นาที มีอัตราการอยู่รอดของเชื้อสูง ใช้งานง่ายสะดวก สามารถนำไปพัฒนาชีวภัณฑ์สำหรับเกษตรกรทดสอบการควบคุมโรคในแปลงได้ โดยไม่ต้องเตรียมเชื้อสดทุกครั้ง

เกตน์ณนิภา วันชัย และสมาพร เรืองสังข์ (2557) คัดแยกแบคทีเรีย PSB จากดินนาข้าวในอำเภอบางบาล จังหวัดพระนครศรีอยุธยา โดยใช้อาหารแข็ง PVK ในการคัดเลือก และทดสอบประสิทธิภาพการละลายฟอสเฟตในอาหารเหลวด้วยวิธีโมลิบดีนั่มบลู (Molybdenum blue method) ผลการทดลองพบว่าสามารถแยกแบคทีเรียได้ทั้งหมด 45 ไอโซเลท โดยคัดเลือกไอโซเลทที่มีประสิทธิภาพในการละลายฟอสเฟตได้สูงมาจัดจำแนกชนิดได้เป็น *Burkhoderia* sp. และ *Pantoea dispersa* ซึ่งมีประสิทธิภาพการละลายฟอสเฟตได้ 179.8 และ 187.0 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ หลังจากนั้นนำเชื้อที่คัดแยกได้มาตรึงบนขี้เถ้าแกลบเพื่อศึกษาผลของแบคทีเรีย PSB ที่ตรึงบนขี้เถ้าแกลบต่อการเจริญของข้าวพันธุ์ กข47 ในระยะเวลาการปลูก 30 วัน ผลการทดลองพบว่าข้าวมีการเจริญเติบโตทั้งในด้านความสูง จำนวนใบ ความยาวราก และน้ำหนักแห้งของลำต้นในแต่ละตำรับการทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยข้าวที่มีการเติมเชื้อ *Burkhoderia* sp. และตรึงบนขี้เถ้าแกลบมีการเจริญเติบโตมากที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าเชื้อที่ตรึงบนขี้เถ้าแกลบให้ผลต่อการเจริญของข้าวได้ดีกว่าเชื้อที่ไม่มีวัสดุตรึง

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

หัวเชื้อแบคทีเรียสูตรน้ำ

การผลิตหัวเชื้อแบคทีเรียสูตรน้ำ สามารถใช้วัสดุที่เป็นน้ำ น้ำมัน พอลิเมอร์ เพื่อช่วยเพิ่มความหนืด ความคงตัว ลดแรงตึงผิว และความสามารถในการกระจายตัวของเซลล์ เนื่องจากหัวเชื้อจุลินทรีย์สูตรน้ำง่ายต่อการผลิตและมีราคาถูกกว่าสูตรที่เป็นของแข็ง จึงเป็นที่นิยมในท้องตลาด แม้ว่าหัวเชื้อสูตรน้ำจะสามารถจัดเก็บไว้ได้เป็นระยะเวลานาน แต่จุลินทรีย์ก็มีแนวโน้มที่จะพบสภาวะเครียด เนื่องจากการขาดสารอาหาร ขาดออกซิเจน และการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ส่งผลให้จำนวนประชากรเซลล์ลดลงอย่างมาก จึงต้องมีการใส่สารเติมแต่งเพื่อเพิ่มอัตราการอยู่รอดของ

เซลล์สำหรับการเก็บในระยะยาว Lee และคณะ (2016) ได้ประเมินความมีชีวิตรอดของหัวเชื้อ *Rhodopseudomonas palustris* สายพันธุ์ PS3 สูตรน้ำที่มีการใส่สารเติมแต่งชนิดต่าง ๆ ลงไป และทดสอบประสิทธิภาพในการส่งเสริมการเจริญของพืช พบว่า หัวเชื้อสูตรน้ำที่มีการเติม Horticultural oil ที่ความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์ เป็นวัสดุพาหะมีประสิทธิภาพเหมาะสมต่อการผลิตหัวเชื้อสูตรน้ำมากที่สุด เนื่องจากสามารถรักษาปริมาณและคงความมีชีวิตของเซลล์ได้ค่อนข้างสูง เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุพาหะชนิดอื่นที่สภาวะต่าง ๆ และสามารถส่งเสริมการเจริญของผักกะหล่ำปลีจีนได้สูงกว่าชุดควบคุม โดยน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในช่วง 10-27 และ 22–40 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เช่นเดียวกับรายงานวิจัยของจีราภรณ์ อินทสาร, ปฏิภาณ สุทธิกุลบุตร และจักรพงษ์ ไชยวงศ์ (2556) ที่ศึกษาการใช้ประโยชน์จากหัวเชื้อจุลินทรีย์ละลายฟอสเฟตในรูปของหัวเชื้อเหลวเข้มข้นซึ่งมีปริมาณจุลินทรีย์เท่ากับ 1×10^9 CFU/มิลลิกรัม ต่อการเจริญของลำไยในพื้นที่อำเภอดอยสะเก็ดและอำเภอสันป่าตอง จังหวัดเชียงใหม่ โดยเป็นเชื้อแบคทีเรียไอโซเลท B01 และ B04 ที่มีประสิทธิภาพในการละลายฟอสฟอรัสสูงสุดจากการวัดค่าวงใส (Clear zone) ได้เท่ากับ 4.72 และ 5.83 เซนติเมตร และมีปริมาณการละลายฟอสฟอรัสในอาหารเหลวเท่ากับ 446 และ 632 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ซึ่งแยกได้จากตัวอย่างดินบริเวณรากของต้นลำไย

จากการศึกษารายงานการวิจัยแบคทีเรียที่ละลายฟอสเฟตในช่วงปี พ.ศ. 2549-2560 พบว่าการศึกษาแบคทีเรียที่ละลายฟอสเฟตทั้งในและต่างประเทศ มักเป็นการคัดแยกเชื้อจากดินบริเวณรากข้าวเป็นส่วนใหญ่ แต่ในพื้นที่ดินสวนผลไม้ยังไม่มีการศึกษามากนัก จึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจในการศึกษาและคัดเลือกแบคทีเรียละลายฟอสเฟตจากดินสวนเกษตรอินทรีย์ หมู่บ้านโป่งแรด ตำบลพลับพลา อำเภอเมือง จังหวัดจันทบุรี ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีความเป็นไปได้สูงในการตรวจพบจุลินทรีย์ดินที่มีประโยชน์ และอาจพัฒนาการใช้งานในรูปหัวเชื้อจุลินทรีย์ละลายฟอสเฟตที่มีประสิทธิภาพในการละลายฟอสฟอรัสในดินให้อยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืช

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี