



ไรโซแบคทีเรียส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช: หลักการและการใช้ประโยชน์

ศุภชาติ ธรรมนิติเวทย์^{1*}

¹สำนักวิจัยและพัฒนาการเกษตรเขตที่ 2 ต.วังทอง อ.วังทอง จ.พิษณุโลก 65130

*Corresponding author: sup_th@hotmail.com

(Received November 23, 2020; Revised February 3, 2021; Accepted June 1, 2021)

บทคัดย่อ

ไรโซแบคทีเรียส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชหรือที่นิยมเรียกกัน “พีจีพีอาร์” (PGPR) พบในบริเวณเขตอิทธิพลรากพืช จัดเป็นแบคทีเรียที่อาศัยอยู่ภายในรากพืช (iPGPR) แบบสมชีพ เช่น แบคทีเรียในปมรากพืช และแบคทีเรียอาศัยอยู่ภายนอกรากพืช (ePGPR) แบบการดำรงชีวิตอย่างอิสระในดิน เช่น แบคทีเรียที่อาศัยอยู่ใกล้ผิวรากพืช คุณสมบัติของพีจีพีอาร์ที่พึงประสงค์ ได้แก่ 1) เพิ่มปริมาณได้ง่ายบริเวณผิวรากพืช 2) ควบคุมจุลินทรีย์ก่อโรคพืช และ 3) ทนทานต่อการขาดน้ำ ความเค็ม ความร้อน และรังสีอัลตราไวโอเลต อีกทั้งยังมีกลไกส่งเสริมการเจริญเติบโตทั้งทางตรง ได้แก่ การตรึงไนโตรเจน การละลายฟอสเฟต การละลายโพแทสเซียม การผลิตฮอร์โมนพืช และการเจริญของรากพืช กลไกส่งเสริมการเจริญเติบโตทางอ้อม ได้แก่ การผลิตสารปฏิชีวนะ การผลิตไซเดอร์ฟออร์ การทนทานต่อสภาพแวดล้อม และการทนทานต่อโลหะหนัก ด้วยคุณสมบัติที่เป็นประโยชน์ดังกล่าวพีจีพีอาร์จึงถูกนำมาทำเป็นผลิตภัณฑ์ปุ๋ยชีวภาพที่พัฒนาขึ้นโดยกรมวิชาการเกษตร ประกอบด้วย 1) ปุ๋ยชีวภาพไรโซเบียม 2) ปุ๋ยชีวภาพพีจีพีอาร์ 3 ชนิด ได้แก่ ปุ๋ยชีวภาพพีจีพีอาร์-วัน (สำหรับข้าวโพดและข้าวฟ่าง) พีจีพีอาร์-ทู (สำหรับข้าว) และพีจีพีอาร์-ทรี (สำหรับอ้อยและมันสำปะหลัง) และ 3) ปุ๋ยชีวภาพละลายฟอสเฟต เมื่อนำปุ๋ยชีวภาพไรโซเบียม ปุ๋ยชีวภาพพีจีพีอาร์ และปุ๋ยชีวภาพละลายฟอสเฟตมาใช้กับการผลิตพืชสามารถลดการปุ๋ยเคมีได้ร้อยละ 50 25 และ 25-50 ตามลำดับ นอกจากนี้การใช้ปุ๋ยชีวภาพยังช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับพืชและเพิ่มผลผลิตให้แก่เกษตรกร

คำสำคัญ: ไรโซแบคทีเรีย, พีจีพีอาร์, เขตอิทธิพลรากพืช, ปุ๋ยชีวภาพ, การผลิตพืช

Plant Growth Promoting Rhizobacteria: Principles and Utilization

Subhajati Dharmanitivedya^{1*}

¹Office of Agricultural Research and Development Region 2, Wangthong Sub-district, Wangthong District, Phitsanulok Province, 65130

*Corresponding author: sup_th@hotmail.com

(Received November 23, 2020; Revised February 3, 2021; Accepted June 1, 2021)

Abstract

Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) discovered in the rhizosphere area. PGPR are intracellular PGPR (iPGPR) existing symbiotic relationship such as root nodule bacteria and extracellular PGPR (ePGPR) existing free living in the soil such as bacteria existing near the root. PGPR have specific properties such as 1) colonize the root surface, 2) control of plant pathogens and 3) tolerant to drought, salinity, heat and ultraviolet radiation. Also, PGPR have promote growth by direct mechanism such as nitrogen fixation, phosphate solubilization, potassium solubilization, phytohormone production, and root development and indirect mechanism such as antibiotic production, siderophore production, environmental tolerance and heavy metal tolerance. From beneficial properties as mentioned above, PGPR were brought to biofertilizer products by Department of Agriculture has developed including 1) rhizobium biofertilizers, 2) PGPR biofertilizers have three products such as PGPR-1 biofertilizer (for maize and millet), PGPR-2 biofertilizer (for rice), PGPR-3 biofertilizer (for sugarcane and cassava) and 3) phosphate solubilizing biofertilizer. When used the rhizobium, PGPR, and phosphate biofertilizers with crop production could be decreased the chemical fertilizers are less than 50, 25 and 25-50 percentages, respectively. Furthermore, the use of biofertilizers can be increased crop healthy and yield for farmers.

Keywords: Rhizobacteria, PGPR, Rhizosphere, Biofertilizer, Crop Production

บทนำ

ไรโซแบคทีเรียส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช หรือ PGPR (พืจีพีอาร์) ย่อมาจาก Plant Growth Promoting Rhizobacteria เป็นจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์อาศัยอยู่เขตอหิพลากรากพืช (Reddy, 2014) ถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1888 โดย Martinus W. Beijerinck ได้แยกแบคทีเรีย *Bacillus radicicola* จากปมรากพืช (Laranjo et al., 2014) ที่สามารถเปลี่ยนก๊าซไนโตรเจน (N_2) จากบรรยากาศไปเป็นไนโตรเจนรูปที่เป็นประโยชน์ ซึ่งพืชสามารถนำไปใช้ได้ จึงนำไปสู่การค้นพบแบคทีเรียที่อาศัยอยู่ในพืช (Gray & Smith, 2005) ในพื้นที่ระหว่างเซลล์อะโพพลาสต์ (apoplastic intercellular space) ในเนื้อเยื่อพารانشิม (parenchyma tissue) (Vessey, 2003) และมีการดำรงชีวิตอย่างอิสระในดินใกล้ผิวรากพืช (Glick, 1995) หรือแบคทีเรียที่อาศัยอยู่ภายนอกเซลล์พืช (Gray & Smith, 2005)

พืจีพีอาร์มีกลไกส่งเสริมการเจริญเติบโต 2 ประการ กล่าวคือ กลไกที่ส่งเสริมการเจริญเติบโตทางตรง และทางอ้อมแก่พืช (Reddy, 2014) ซึ่งกลไกที่ส่งเสริมการเจริญเติบโตทางตรง ได้แก่ การตรึงก๊าซไนโตรเจน (N_2) จากบรรยากาศ (Vessey, 2003; Gray & Smith, 2005) มีความสามารถในการละลายธาตุฟอสฟอรัสในดิน ละลายโพแทสเซียมในเขตอหิพลากรากพืช (Etesami et al., 2017) การผลิตฮอร์โมนพืชและเอนไซม์หลายชนิด (Vessey, 2003; Vijayabharathi et al., 2016) และกระตุ้นการเจริญและแตกแขนงของราก (Erturk et al., 2010; Kudoyarova et al., 2019) และกลไกที่ส่งเสริมการเจริญเติบโตทางอ้อม ได้แก่ การผลิตสารปฏิชีวนะ (Kloepper & Schroth, 1981) ที่เป็นปฏิปักษ์กับจุลินทรีย์ก่อโรคพืช (Gouda et al., 2018) การผลิตไซโตไคน์สำหรับยับยั้งการเน่าในดิน (Vijayabharathi et al., 2016) การทนทานต่อสภาพแวดล้อม (Goswami & Deka, 2020) และการทนทานต่อโลหะหนัก (Tiwari & Lata, 2018)

ด้วยคุณสมบัติที่เป็นประโยชน์ในฐานะปุ๋ยชีวภาพของพืจีพีอาร์ อีกทั้งมีการทดลองในพืชปลูกหลายชนิด ได้แก่ ธัญพืช พืชตระกูลถั่ว ไม้ผล ผัก สมุนไพร และไม้ประดับ ประกอบกับสายพันธุ์พืจีพีอาร์ที่มีศักยภาพ จึงนำมาทำเป็นปุ๋ยชีวภาพที่มีความสำคัญในเชิงพาณิชย์ อย่างไรก็ตามการพัฒนาสายพันธุ์พืจีพีอาร์ที่มีคุณภาพ โดยกรมวิชาการเกษตรได้มีการพัฒนาปุ๋ยชีวภาพ 3 ชนิด ได้แก่ ปุ๋ยชีวภาพไรโซเบียม (จิตรา และคณะ, 2561) ปุ๋ยชีวภาพพืจีพีอาร์ (ได้แก่ ปุ๋ยชีวภาพพืจีพีอาร์-วัน พืจีพีอาร์-ทู และพืจีพีอาร์-ทรี) และปุ๋ยชีวภาพละลายฟอสเฟต (สุปราณี และคณะ, 2561) โดยบทความนี้ผู้เขียนหวังว่าจะเป็นประโยชน์ต่อนักเรียน นิสิต นักศึกษา ครู อาจารย์ นักวิจัย ตลอดจนเกษตรกร ที่จะนำความรู้ไปเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อยอดสู่การปฏิบัติต่อไป

เขตอหิพลากรากพืช

เขตอหิพลากรากพืช (rhizosphere) คือ บริเวณของดินที่อยู่ติดกับรากพืช มีชนิด จำนวน และกิจกรรมของจุลินทรีย์แตกต่างจากดินบริเวณรอบ ๆ รากพืชนั้น (สำนักงานราชบัณฑิตยสภา, 2562) นอกจากนี้ยังมีการให้ความหมายใหม่ของเขตอหิพลากรากพืช หมายถึง ปริมาตรของดินที่มีอิทธิพลต่อรากพืช ส่วนของเนื้อเยื่อรากพืช และดินที่อยู่ติดกับรากพืชมีคุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และชีวภาพที่เปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากการเจริญเติบโตและกิจกรรมของรากพืช (Shaikh et al., 2018) มีระยะยื่นออกจากผิวรากพืชประมาณ 2-3 มิลลิเมตร เขตอหิพลากรากพืชประกอบด้วย 3 บริเวณ ได้แก่ 1) เขตอหิพลากรากพืชภายใน (endorhizosphere) ประกอบด้วยชั้นคอร์เท็กซ์ของราก เป็นบริเวณที่สัมผัสกับสารละลายดิน 2) ผิวรากพืช (rhizoplane) ประกอบด้วยผิวชั้นนอกสุดของรากพืช (รวมถึงขนราก) ที่ติดกับดิน และ 3) เขตอหิพลากรากพืชภายนอก (exorhizosphere) ประกอบด้วยดินที่ติดกับรากพืช ซึ่งมีอิทธิพลอย่างยิ่งต่อรากพืช (Weil & Brady, 2017)

สามารถอธิบายองค์ประกอบของเขตอิทธิพลรากพืชโดยสรุปย่อแบบองค์รวม (Table 1) (York et al., 2016) และแผนภาพของรากในเขตอิทธิพลรากพืช (Figure 1)

Table 1 Lists of rhizosphere components generally accepted definitions, and their spatial extent (size). (York et al., 2016)

Component	Size	Definition
Rhizosphere	~cm	Soil influenced by roots
Rhizoplane	1 mm	Root epidermis, mucilage, and adhering soil
Rhizosheath	1 mm	Soil adhered by root hairs and mucilage
P depletion zone	3 mm	Concentration gradient of P in soil solution due to uptake
N depletion zone	2 cm	Concentration gradient of N in soil solution due to uptake
Accumulation zone	1 mm	Calcium from mass flow but not adsorbed
Soil structure modification	1 cm	Changes in soil porosity, soil architecture modification
Oxygen depletion	3 mm	Oxygen uptake due to root and microbial respiration
CO ₂ accumulation	3 mm	Respired carbon dioxide from roots and microbes
Exudation zone	2 mm	Sugars, mucilage, acids, allelochemicals released by roots
Microbe	µm-m	Fungal mycelia transcend six orders of magnitude in scale

เขตอิทธิพลรากพืช เป็นแหล่งที่เต็มไปด้วยคาร์บอนที่เป็นประโยชน์ (Shaikh et al., 2018) แต่เนื่องจากการสูญเสียคาร์บอนโดยการปลดปล่อยจากรากพืช (rhizodeposition) (Lynch & Whipps, 1990) ซึ่งประกอบด้วยคาร์บอนจาก คาร์โบไฮเดรต น้ำตาล กรดอินทรีย์ วิตามิน ฟลาโวนอยด์ นิวคลีโอไทด์ เอนไซม์ (Prasad et al., 2019) ฮอร์โมน (Tsukanova et al., 2017) ไอออนอินทรีย์และแก๊ส (Prasad et al., 2019) (Table 2) ดังนั้นเขตอิทธิพลรากพืชจึงเป็นแหล่งชุมชนจุลินทรีย์ (microbial community) ที่ประกอบด้วยสิ่งมีชีวิตกินซาก (saprophytes) จุลินทรีย์อาศัยในราก (endophytes) พืชอิงอาศัย (epiphytes) จุลินทรีย์ก่อโรคพืช (pathogens) และจุลินทรีย์หลายชนิดที่เป็นประโยชน์ (useful microorganisms) (Avis et al., 2008) อีกทั้งลักษณะทางเคมีและชีวภาพของของเขตอิทธิพลรากพืชภายนอกมีความแตกต่างอย่างยิ่งกับ ดินที่อยู่ภายนอกเขตอิทธิพลรากพืช (bulk soil) เพราะดินในเขตอิทธิพลรากพืชมีค่าความเป็นกรดที่ต่ำกว่าภายนอกเขตอิทธิพลรากพืช ส่งผลให้รากพืชดูดซึมธาตุอาหารได้ดีตามไปด้วย (Weil & Brady, 2017)

รากพืชช่วยเพิ่มสารประกอบอินทรีย์หลายชนิด (organic compounds) ให้เข้าสู่เขตอิทธิพลรากพืชได้โดย 6 วิธี (Weil & Brady, 2017) ได้แก่ (ดู Figure 1 ประกอบ)

1. เซลล์หลายเซลล์จากหมวกราก (root cap) และเนื้อเยื่อชั้นผิว (epidermis) หลุดออกอย่างต่อเนื่องเพื่อทำให้รากเติบโตและเพิ่มมากขึ้นในเขตอิทธิพลรากพืช

Table 2 Classes of compounds released in plant root exudates. (Bardi & Vivanco, 2009; Vives-Peris et al., 2020)

Class of compounds	Single compounds
Carbohydrates	Arabinose, glucose, galactose, fructose, sucrose, pentose, rhamnose, raffinose, ribose, xylose and mannitol
Amino acids	All 20 proteinogenic amino acids, L-hydroxyproline, homoserine, mugineic acid, aminobutyric acid
Organic acids	Acetic acid, succinic acid, L-aspartic acid, malic acid, L-glutamic acid, salicylic acid, shikimic acid, isocitric acid, chorismic acid, sinapic acid, caffeic acid, <i>p</i> -hydroxybenzoic acid, gallic acid, tartaric acid, ferulic acid, protocatechuic acid, <i>p</i> -coumaric acid, mugineic acid, oxalic acid, citric acid, piscidic acid
Flavonoids	Naringenin, kaempferol, quercetin, myricetin, naringin, rutin, genistein, strigolactone and their substitutes with sugars
Lignins	Catechol, benzoic acid, nicotinic acid, phloroglucinol, cinnamic acid, gallic acid, ferulic acid, syringic acid, sinapoyl aldehyde, chlorogenic acid, coumaric acid, vanillin, sinapyl alcohol, quinic acid, pyroglutamic acid
Coumarins	Umbelliferone
Aurones	Benzyl aurones synapates, sinapoyl choline
Glucosinolates	Cyclobrassinone, desulphoglucosinapin, desulphoprogoitrin, desulphonapoleiferin, desulphoglucoalyssin
Anthocyanins	Cyanidin, delphinidin, pelargonidin and their substitutes with sugar molecules
Indole compounds	Indole-3-acetic acid, brassitin, sinalexin, brassilexin, methyl indole carboxylate, camalexin glucoside
Fatty acids	Linoleic acid, oleic acid, palmitic acid, stearic acid
Sterols	Campesterol, sitosterol, stigmasterol
Allomones	Jugulone, sorgoleone, 5,7,4'-trihydroxy-3',5'-dimethoxyflavone, DIMBOA, DIBOA
Proteins and enzymes	PR proteins, lectins, proteases, acid phosphatases, peroxidases, hydrolases, lipase
Inorganic ions and gaseous molecules	CO ₂ , H ₂ , H ⁺ , OH ⁻ , HCO ₃ ⁻

2. เซลล์ใกล้ปลายราก (root tip) ขับถ่ายสารคล้ายวุ้นที่มีลักษณะเป็นเมือก (mucilage gel) ที่ไม่ละลายน้ำ (mucigel) จำนวนมาก
3. เซลล์เนื้อเยื่อชั้นผิว (epidermal cells) ฉีกขาด จากการเสียดสีหรือถูกจุลินทรีย์เข้าทำลาย และทำให้เซลล์แตกทะลักไปผสมกับดินที่อยู่ติดกับรากพืช
4. เซลล์เนื้อเยื่อชั้นผิว ประกอบด้วย ขนราก (root hairs) ที่ผลิตและขับสารประกอบที่มีความเฉพาะเจาะจง (specific compounds) ออกมา
5. เซลล์คอร์เทกซ์ (cortical cells) ร่วอย่างช้า ๆ หรือในบางกรณีขับสารทุติยภูมิหลายชนิดที่พืชสร้างขึ้น (plant metabolites) ออกมา
6. บางครั้งเซลล์เปลี่ยนนอกขับสารประกอบอินทรีย์หลายชนิดโดยตรงให้ราสมชีฟ (symbiotic fungi) กับรากพืช

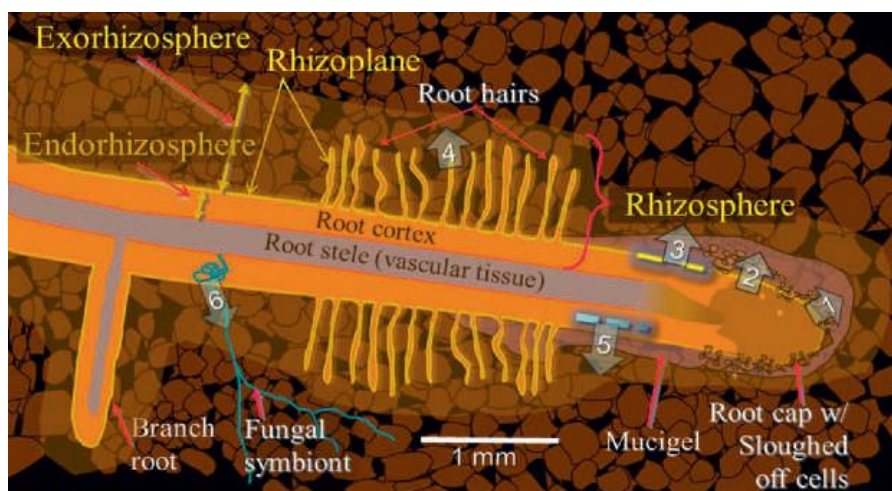


Figure 1 Diagram of a root showing the rhizosphere (light brown shaded area) and its three zones: the endorhizosphere consisting of the root cortex where the solution is in contact with the soil solution, the exorhizosphere consisting of the soil in the immediate vicinity of the root and profoundly under its influence, and the rhizoplane consisting of the outer surface of the root including its root hairs. Six ways that roots add organic compounds to the rhizosphere are also shown (broad numbered arrows): (1) sloughing off of root cap cells; (2) excretion of mucigel; (3) spilling of cell contents when epidermal cells are lysed (broken); (4) exudation of specific compounds produced by root hairs; (5) exudation of various compounds by cortical cells; (6) export of organic compounds to symbiotic fungi. (Weil & Brady, 2017)

ชนิดและบทบาทของฟิจีฟิอาร์

ดิน (soil) คือ วัสดุตามธรรมชาติที่ปกคลุมผิวโลก เกิดจากการผุพังสลายตัวของหินและแร่ ผสมกับอินทรีย์วัตถุ ทำหน้าที่เป็นฐานสำหรับการเติบโตของพืช (สำนักงานราชบัณฑิตยสภา, 2562) ดินประกอบด้วยจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์และเป็นโทษแก่ชุมชนพืช (community of plants) โดยจุลินทรีย์เป็นสิ่งมีชีวิตที่มีบทบาทต่อคุณภาพของดินและเป็นประโยชน์ต่อพืช คือ “ฟิจีฟิอาร์” (Mittal et al., 2017) ด้วยลักษณะของ

พืจีพีอาร์ที่พบอาศัยอยู่ทั้งบริเวณในระบบรากพืช และเขตอิทธิพลรากพืช สามารถแบ่งพืจีพีอาร์เป็น 2 ชนิด (หนึ่ง และคณะ, 2548) คือ

1. พืจีพีอาร์ที่อาศัยอยู่ภายในเซลล์รากพืช (intracellular PGPR) หรือ iPGPR หมายถึง กลุ่มพืจีพีอาร์ที่เข้าอาศัยภายในเซลล์รากพืช พบในโครงสร้างเฉพาะที่เป็นปมของโรโซเบียมกับพืชตระกูลถั่ว (Gray & Smith, 2005) ได้แก่ *Allorhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Mesorhizobium* และ *Rhizobium* (Verma et al., 2010; Bhattacharyya & Jha, 2012)

2. พืจีพีอาร์ที่อาศัยอยู่นอกเซลล์รากพืช (extracellular PGPR) หรือ ePGPR หมายถึง กลุ่มพืจีพีอาร์ที่ไม่ได้เข้าอาศัยภายในเซลล์รากพืช โดยพบพืจีพีอาร์อาศัยอยู่ใกล้กับรากพืช (near roots) อยู่ติดกับผิวรากพืช (rhizoplane) หรืออยู่ระหว่างเซลล์ในชั้นคอร์เท็กซ์ของรากพืช (Gray & Smith, 2005) ได้แก่ *Agrobacterium*, *Arthrobacter*, *Azotobacter*, *Azospirillum*, *Bacillus*, *Burkholderia*, *Caulobacter*, *Chromobacterium*, *Erwinia*, *Flavobacterium*, *Micrococcus*, *Pseudomonas* และ *Serratia* (Bhattacharyya & Jha, 2012; Gray & Smith, 2015)

พืจีพีอาร์ทั้งชนิด iPGPR และ ePGPR (Figure 2) มีบทบาทในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชหลายด้าน ได้แก่ การสร้างราก (Erturk et al., 2010) การเพิ่มจำนวนขนราก การแตกแขนงของขนราก (Vacheron et al., 2013) การงอกของเมล็ด การเจริญของต้นกล้า (Noumavo et al., 2013) การเกิดและการทำหน้าที่ของปมราก (Zhang et al., 1996) การเพิ่มพื้นที่ใบ จำนวนใบ จำนวนหัว (Batool et al., 2020) การผลิตชีวมวล (Pereira et al., 2020) การผลิตฮอร์โมนพืช (Tsukanova et al., 2017) การเพิ่มสารอาหาร (Ipek et al., 2014) การดูดน้ำ (Mekonnen & Kibret, 2021) เป็นต้น

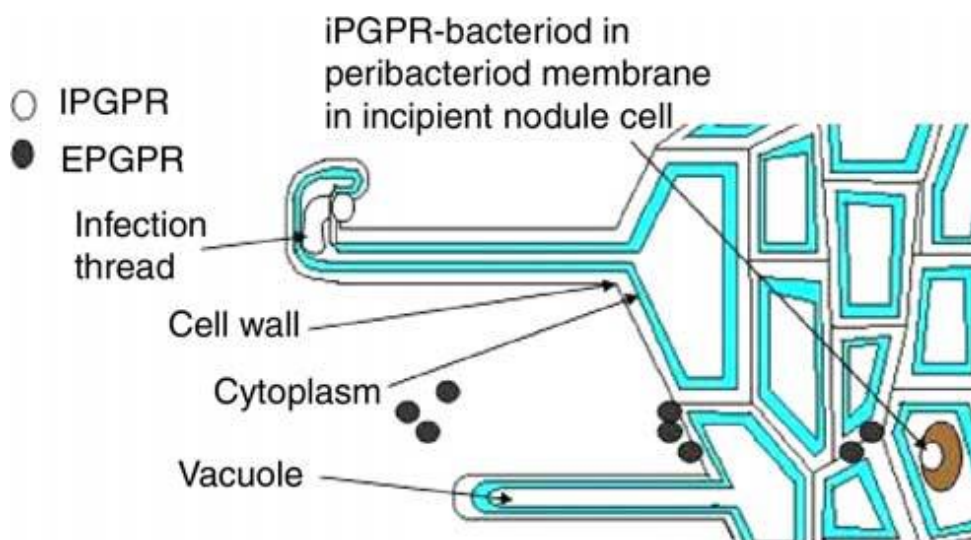


Figure 2 Degree of bacterial associations among plant roots: iPGPR producing nodules and inhabiting the plant root (in this case (i) on the surface of a root hair during infection and (ii) in the plant cytoplasm); and ePGPR ((i) living near, but not in contact with roots; (ii) colonizing the root surface; (iii) living in spaces between cells of the root cortex). (Gray & Smith, 2005)

คุณสมบัติของฟิซีฟิอาร์

ฟิซีฟิอาร์ที่ดีในอุดมคติ ควรมีคุณลักษณะที่มีคุณสมบัติจำเพาะ ได้แก่ 1) มีประสิทธิภาพในการเพิ่มปริมาณ (กลุ่มของแบคทีเรีย) ได้ง่ายบริเวณผิวรากพืช 2) มีชีวิตอยู่รอด เพิ่มจำนวนแบบทวีคูณ และแข่งขันกับจุลินทรีย์ชนิดอื่น ๆ ได้ เพื่อส่งเสริมการเติบโตของพืช (Ahemad & Kibret, 2014) และควบคุมจุลินทรีย์ก่อโรคพืช (Mittal et al., 2017) และ 3) ทนทานต่อการขาดน้ำ (Batool et al., 2020) ความเค็ม (Arora et al., 2020) ความร้อน (Sarkar et al., 2018) และรังสีอัลตราไวโอเล็ต หรือรังสียูวี (Reddy, 2014)

กลไกการทำงานของฟิซีฟิอาร์

ฟิซีฟิอาร์เป็นไรโซแบคทีเรียที่มีประโยชน์ต่อพืช 2 ประเภท กล่าวคือ ไรโซแบคทีเรียที่มีความสัมพันธ์แบบสมชีพ (symbiotic relationship) กับรากพืช และมีการดำรงชีวิตอย่างอิสระในดิน (soil free living) ซึ่งฟิซีฟิอาร์มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชโดยอาศัยกลไกส่งเสริมการเจริญเติบโตทั้ง 2 ประเภท (Glick et al., 1999) คือ

1. กลไกส่งเสริมการเจริญเติบโตทางตรง (direct mechanism) เป็นกลไกที่ทำให้พืชเจริญเติบโตได้ด้วยการอาศัยฟิซีฟิอาร์ตรึงไนโตรเจน ละลายฟอสเฟต ละลายโพแทสเซียม ผลิตฮอร์โมนพืช และการเจริญของรากพืช มีรายละเอียดดังนี้

1.1 การตรึงไนโตรเจน (nitrogen fixation) ไรโซแบคทีเรียตรึงก๊าซไนโตรเจนจากบรรยากาศ และช่วยชะลอการเคลื่อนย้ายไนโตรเจนใหม่ (N remobilization) ในพืช เพื่อเพิ่มผลผลิตพืช (Kuan et al., 2016) ที่มีทั้งไรโซแบคทีเรียที่มีความสัมพันธ์แบบสมชีพกับปมรากพืชตระกูลถั่ว และมีการดำรงชีวิตอย่างอิสระในดิน (Goswami et al., 2016) ไรโซแบคทีเรียเหล่านี้ ได้แก่ สกุล *Acetobacter*, *Achromobacter*, *Alcaligenes*, *Allorhizobium*, *Azoarcus*, *Azorhizobium*, *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Bacillus*, *Beijerinckia*, *Bradyrhizobium*, *Burkholderia*, *Clostridium*, *Corynebacterium*, *Derrxia*, *Enterobacter*, *Erwinia*, *Flavobacterium*, *Frankia*, *Gluconacetobacter*, *Herbaspirillum*, *Klebsiella*, *Mesorhizobium*, *Pseudomonas*, *Rhizobium*, *Rhodopseudomonas*, *Rhodospirillum*, *Sinorhizobium* และ *Xanthobacter* (Vessey, 2003; Bhattacharyya & Jha, 2012; Prashar et al., 2013; Mittal et al., 2017)

1.2 การละลายฟอสเฟต (phosphate solubilization) ไรโซแบคทีเรียละลายฟอสเฟตในเขตอิทธิพลรากพืช (Vessey, 2003) ในรูปที่ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ได้แก่ ไตรแคลเซียม หินฟอสเฟต อะลูมิเนียมฟอสเฟต และอื่น ๆ (Goswami et al., 2016) โดยไรโซแบคทีเรียสามารถทำให้ฟอสเฟตอยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ (ดูลิต, 2556) และพืชดูดซึมฟอสฟอรัสได้ 2 รูป ได้แก่ ไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (H_2PO_4^-) และ ไฮโดรเจนฟอสเฟต (HPO_4^{2-}) (ดูลิต, 2556; Shukla, 2019) หรือออร์โธฟอสเฟต (ดูลิต, 2556) ไรโซแบคทีเรียเหล่านี้ ได้แก่ สกุล *Arthrobacter*, *Azotobacter*, *Bacillus*, *Beijerinckia*, *Burkholderia*, *Enterobacter*, *Erwinia*, *Flavobacterium*, *Microbacterium*, *Pseudomonas*, *Rhizobium* และ *Serratia* (Ahemad & Kibret, 2014; Mittal et al., 2017)

1.3 การละลายโพแทสเซียม (potassium solubilization) ไรโซแบคทีเรียละลายโพแทสเซียมในเขตอิทธิพลรากพืช (Etesami et al., 2017) ในรูปที่ไม่สามารถแลกเปลี่ยนได้ (Jaiswal et al., 2016) เนื่องจากถูกตรึงที่ผิวของอนุภาคดินเหนียวและอินทรีย์วัตถุ (Meena et al., 2016) ตามสัมพรรคภาพ (affinity) ที่แปรผันตามอนุกรมละลายง่าย (lyotropic series) (Hopkins & Hüner, 2009) และพืชดูดซึมโพแทสเซียมในรูปประจวบ (K⁺) ที่สามารถเคลื่อนย้ายได้ดีในพืช ไรโซแบคทีเรียเหล่านี้ ได้แก่ สกุล

Acidithiobacillus, *Aminobacter*, *Arthrobacter*, *Bacillus*, *Burkholderia*, *Cladosporium*, *Collimonas*, *Enterobacter*, *Paenibacillus* และ *Sphingomonas* (Jaiswal et al., 2016; Meena et al., 2016)

1.4 การผลิตฮอร์โมนพืช (phytohormone production) ไรโซแบคทีเรียสามารถผลิตฮอร์โมนพืช ได้แก่ ออกซิน (Yousef, 2018) จิบเบอเรลลิน (Joo et al., 2005) ไซโทไคนิน (Liu et al., 2013) กรดแอบไซซิก (Kang et al., 2019) เอทิลีน (Saleem et al., 2007) กรดซาลิไซลิก (Zhang et al., 2002) และกรดจัสโมนิก (Ryu et al., 2004) ช่วยกระตุ้นการเติบโตและการเจริญของพืชเพื่อให้ต้านทานต่อความเครียดชีวภาพ (biotic stress) และทนทานต่อความเครียดชีวภาพ (abiotic stress) (Tsukanova et al., 2017) ไรโซแบคทีเรียเหล่านี้ ได้แก่ สกุล *Aeromonas*, *Agrobacterium*, *Alcaligenes*, *Azospirillum*, *Bacillus*, *Bradyrhizobium*, *Burkholderia*, *Comamonas*, *Enterobacter*, *Phyllobacterium*, *Pseudomonas*, *Rhizobium*, *Serratia* และ *Variovorax* (Vessey, 2003; Tsukanova et al., 2017)

1.5 การเจริญของรากพืช (plant root development) ไรโซแบคทีเรียบางสกุลสามารถสังเคราะห์ กรดอินโดลอะซิติก (indole-3-acetic acid) หรือ IAA (Erturk et al., 2010) หรือฮอร์โมนกลุ่มออกซินในระดับที่เหมาะสม (Kudoyarova et al., 2019) สำหรับกระตุ้นให้เกิดรากและการเจริญของรากจากกิ่งตัดชำ (Erturk et al., 2010) และยังกระตุ้นให้เกิดการแตกแขนงของราก (Kudoyarova et al., 2019) ส่งผลให้รากดูดซึม ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเพิ่มมากขึ้น (Hayat et al., 2010) ไรโซแบคทีเรียเหล่านี้ ได้แก่ สกุล *Agrobacterium*, *Alcaligenes*, *Bacillus*, *Comamonas*, *Paenibacillus*, *Pseudomonas* และ *Streptomyces* (Erturk et al., 2010; Bhattacharyya & Jha, 2012)

2. กลไกส่งเสริมการเจริญเติบโตทางอ้อม (indirect mechanism) เป็นกลไกที่ทำให้พืชเจริญเติบโตได้ ด้วยการอาศัยปัจจัยที่ผลิตสารปฏิชีวนะ ผลิตไซเดอร์ฟออร์ การทนทานต่อสภาพแวดล้อม และการทนทานต่อโลหะหนัก มีรายละเอียดดังนี้

2.1 การผลิตสารปฏิชีวนะ (antibiotic production) ไรโซแบคทีเรียช่วยลดปริมาณเชื้อราและแบคทีเรียปฏิชีวนะในเขตอภินิหารรากพืช และเพิ่มการเจริญเติบโตของพืช เนื่องจากการสร้างสารปฏิชีวนะบริเวณรากพืช (Kloepper & Schroth, 1981) ประกอบกับไรโซแบคทีเรียเหนี่ยวนำให้เกิดความต้านทานต่อเชื้อโรค (pathogen) ผ่านกรดซาลิไซลิก (salicylic acid) ที่อาศัยวิถีความต้านทานของพืชทั้งต้น (systemic acquired resistance, SAR) หรือผ่านกรดจัสโมนิก (jasmonic acid) และเอทิลีน (ethylene) จากพืช เพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดความต้านทานของพืชทั้งต้น (induced systemic resistance, ISR) จึงนำไปสู่การควบคุมศัตรูพืชทางชีววิธีที่มีประสิทธิภาพ (Beneduzi et al., 2012) ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพและปริมาณผลผลิตจากพืช (Martinez-Vieros et al., 2010) ไรโซแบคทีเรียเหล่านี้ ได้แก่ สกุล *Actinoplanes*, *Actinomadura*, *Microbispora*, *Micromonospora*, *Nocardia*, *Nocardiopsis* และ *Streptomyces* (Wani & Gopalakrishnan, 2019)

2.2 การผลิตไซเดอร์ฟออร์ (siderophore production) ธาตุเหล็กเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของจุลินทรีย์ โดยจุลินทรีย์จะสร้างสารที่สามารถเข้าจับกับโมเลกุลของธาตุเหล็กได้โดยตรง เรียกโมเลกุลที่มีเฉพาะเจาะจงกับธาตุเหล็กว่า “ไซเดอร์ฟออร์” มีรากศัพท์ภาษากรีกว่า iron carrier หรือตัวพาธาตุเหล็ก (หนึ่ง และนันทกร, 2539) โดยไซเดอร์ฟออร์ถูกผลิตในไซโทซอลหรือในเพอร์ออกซิโซม (Li et al., 2016) ซึ่งต้องอาศัยสารตั้งต้น ได้แก่ ซิเตรท (citrate) กรดอะมิโน (amino acids) ไดไฮดรอกซีเบนโซเอต (dihydroxybenzoate) และ N5-เอซิล-N5-ไฮดรอกซีออร์นิทีน (N5-acyl-N5-hydroxyornithine) ผ่าน 2 วิธี ได้แก่ วิธีที่อาศัยเอนไซม์ non-ribosomal peptide synthetase (NRPS) และวิธีที่ไม่อาศัยเอนไซม์ NRPS (Khan et al., 2018) จากนั้นไซเดอร์ฟออร์จะจับกับเหล็ก ทำให้เกิดประจุไฟฟ้า (iron-charged siderophores) และเคลื่อนย้าย

ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ (cytoplasmic membrane) แล้วแยกเหล็กออกด้วยระบบของเอนไซม์ของไรโซแบคทีเรียในเขตอิทธิพลรากพืช (Miethke, 2013) ให้อยู่ในรูปไอออนที่รากพืชดูดซึมไปใช้ประโยชน์ได้ในสภาวะที่ขาดธาตุเหล็กในดิน (Ahemad & Kibret, 2014) ไรโซแบคทีเรียเหล่านี้ ได้แก่ สกุล *Acinetobacter*, *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Rhodococcus* และ *Serratia* (Prashar et al., 2013)

2.3 การทนทานต่อสภาพแวดล้อม (environmental tolerance) ไรโซแบคทีเรียช่วยให้พืชทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม ได้แก่ ความแห้งแล้ง (Kaushal & Wani, 2015) และความเค็ม (Ilangumaran & Smith, 2017) ทั้งนี้ไรโซแบคทีเรียยังช่วยเพิ่มการเจริญเติบโตของพืช ผลผลิต การผลิตชีวมวล ภายใต้สภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม (Zahir et al., 2009) ไรโซแบคทีเรียเหล่านี้ ได้แก่ สกุล *Arthrobacter*, *Azospirillum*, *Bacillus*, *Burkholderia*, *Glomus*, *Klebsiella oxytoca*, *Pseudomonas*, *Serratia* และ *Xanthobacter* (Zahir et al., 2009; Kumar et al., 2019)

2.4 การทนทานต่อโลหะหนัก (heavy metal tolerance) ไรโซแบคทีเรียช่วยให้พืชทนทานต่อโลหะหนัก ได้แก่ แคดเมียม (Khanna et al., 2019) โคโรเนียม (Wani et al., 2009) ตะกั่ว (Ortiz-Ojeda et al., 2017) นิกเกิล (Cardón et al., 2010) สังกะสี (Wani et al., 2008) และสารหนู (Asif et al., 2020) อีกทั้งยังส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช (Khanna et al., 2019; Rajendran & Sundaram, 2020) และลดความเป็นพิษของโลหะหนัก (Wani et al., 2009) ไรโซแบคทีเรียเหล่านี้ ได้แก่ สกุล *Bacillus*, *Burkholderia*, *Mesorhizobium*, *Pseudomonas*, *Rhizobium* (Wani et al., 2008; Wani et al., 2009; Khanna et al., 2019; Rajendran & Sundaram, 2020)

คำแนะนำการใช้ปุ๋ยชีวภาพ

ปุ๋ยชีวภาพที่พัฒนาขึ้นโดยกรมวิชาการเกษตร อยู่ในรูปผลิตภัณฑ์ที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทันที แบ่งเป็น 3 ชนิด ได้แก่

1. ปุ๋ยชีวภาพไรโซเบียม มีลักษณะเป็นผง ประกอบด้วยแบคทีเรีย *Bradyrhizobium* รับรองไม่น้อยกว่า 1×10^6 โคโลนีต่อปุ๋ยชีวภาพ 1 กรัม ขนาดบรรจุภัณฑ์ 200 กรัม (จิตรา และคณะ, 2561) มีวิธีการใช้ดังนี้

1.1 นำเมล็ดถั่วที่ต้องการปลูกใส่ลงในภาชนะ

1.2 พรมด้วยน้ำเปล่า หรือสารเหนียว เช่น น้ำมันพืช หรือแป้งเปียก ให้ทั่ว

1.3 โรยปุ๋ยชีวภาพไรโซเบียมสำหรับถั่ว 3 ชนิด ในอัตราต่าง ๆ ดังนี้

- ถั่วเขียว โรยปุ๋ยชีวภาพลงบนเมล็ดถั่วเขียว อัตรา 1 ถุงต่อเมล็ดถั่วเขียว 3-5 กิโลกรัม

- ถั่วเหลือง โรยปุ๋ยชีวภาพลงบนเมล็ดถั่วเหลือง อัตรา 1 ถุงต่อเมล็ดถั่วเหลือง 10-12 กิโลกรัม

- ถั่วลิสง โรยปุ๋ยชีวภาพลงบนเมล็ดถั่วลิสง อัตรา 1 ถุงต่อเมล็ดถั่วลิสง 10-15 กิโลกรัม

1.4 คลุกเคล้าผงปุ๋ยชีวภาพไรโซเบียมให้ติดทั่วทุกเมล็ดอย่างสม่ำเสมอ หลังจากคลุกเมล็ดแล้วควรนำไปปลูกให้หมดทันที ร่วมกับการใช้ปุ๋ยเคมีสูตร 8-24-24 อัตรา 35 กิโลกรัมต่อไร่ ในกรณีที่ฟอสเฟตที่เป็นประโยชน์ในดินมีค่าน้อยกว่า 8 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

2. ปุ๋ยชีวภาพฟิซีฟิอาร์ แบ่งเป็น 3 ชนิด ได้แก่ ปุ๋ยชีวภาพฟิซีฟิอาร์-วัน ฟิซีฟิอาร์-ทู และฟิซีฟิอาร์-ทรี (กัลยากร, 2561) มีรายละเอียดดังนี้

2.1 ปุ๋ยชีวภาพฟิซีฟิอาร์-วัน สำหรับข้าวโพดและข้าวฟ่าง มีวิธีการใช้ดังนี้



- ผสมปุ๋ยชีวภาพฟิซีฟิอาร์-วัน จำนวน 1 ถุง กับน้ำให้ข้น แล้วนำเมล็ดข้าวโพด 3-4 กิโลกรัม หรือข้าวฟ่าง 2-3 กิโลกรัม คลุกเคล้าจนเนื้อปุ๋ยเคลือบติดผิวเมล็ด แล้วนำไปปลูกทันที
- ละลายปุ๋ยชีวภาพฟิซีฟิอาร์-วัน จำนวน 1 ถุง ในน้ำสะอาด 20 ลิตร ราดกองปุ๋ยที่หมักสมบูรณ์แล้วประมาณ 250 กิโลกรัม ปรับความชื้นในกองปุ๋ยหมักให้ได้ประมาณ 50-60 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก คลุกเคล้าให้เข้ากันแล้วบ่มไว้เป็นเวลา 1 สัปดาห์ ใช้รองก้นหลุมก่อนปลูกอัตรา 250 กิโลกรัมต่อไร่

2.2 ปุ๋ยชีวภาพฟิซีฟิอาร์-ทู สำหรับข้าว มีวิธีการใช้ดังนี้

- ผสมปุ๋ยชีวภาพฟิซีฟิอาร์-ทู จำนวน 1 ถุง กับเมล็ดข้าวแห้ง 10-15 กิโลกรัม ที่พรมน้ำให้พอเปียก คลุกเคล้าจนเนื้อปุ๋ยเคลือบติดผิวเมล็ด แล้วนำไปหว่าน
- ผสมปุ๋ยชีวภาพฟิซีฟิอาร์-ทู จำนวน 1 ถุง กับเมล็ดข้าวออก 10-15 กิโลกรัม ที่แช่น้ำไว้จนเนื้อปุ๋ยเคลือบติดผิวเมล็ด แล้วนำไปหว่าน
- ผสมปุ๋ยชีวภาพฟิซีฟิอาร์-ทู จำนวน 1 ถุง กับปุ๋ยหมักประมาณ 250 กิโลกรัมต่อไร่ แล้วนำไปหว่านทันที

2.3 ปุ๋ยชีวภาพฟิซีฟิอาร์-ทรี สำหรับอ้อยและมันสำปะหลัง มีวิธีการใช้ดังนี้

- ละลายปุ๋ยชีวภาพฟิซีฟิอาร์-ทรี กับน้ำสะอาดในอัตรา 1:100 (ปุ๋ยชีวภาพฟิซีฟิอาร์-ทรี 1 กิโลกรัม ต่อน้ำ 100 ลิตร) แล้วฉีดพ่นเป็นละอองฝอยละเอียดลงบนท่อนพันธุ์ จากนั้นจึงกลบทับด้วยดินทันที
- ละลายปุ๋ยชีวภาพฟิซีฟิอาร์-ทรี กับน้ำสะอาดในอัตรา 1:20 (ปุ๋ยชีวภาพฟิซีฟิอาร์-ทรี 1 กิโลกรัม ต่อน้ำ 20 ลิตร) แล้วนำไปแช่ท่อนพันธุ์เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นจึงนำไปปลูกทันที
- ผสมละลายปุ๋ยชีวภาพฟิซีฟิอาร์-ทรี จำนวน 1 ถุง กับปุ๋ยหมักประมาณ 250 กิโลกรัมต่อไร่ แล้วนำไปหว่านทันที

3. ปุ๋ยชีวภาพละลายฟอสเฟต มีลักษณะเป็นผง ประกอบด้วยรา *Penicillium pinophilum* ครอบงำ ไม่น้อยกว่า 1×10^7 โคโลนีต่อปุ๋ยชีวภาพ 1 กรัม แบคทีเรีย *Bacillus* ครอบงำ ไม่น้อยกว่า 1×10^8 โคโลนีต่อปุ๋ยชีวภาพ 1 กรัม ขนาดบรรจุภัณฑ์ 500 กรัม เหมาะสำหรับดินที่มีปัญหาการตรึงฟอสเฟตในดินกรดและดินด่าง (สุปราณี และคณะ, 2561) มีวิธีการใช้กับพืช 3 ชนิด ได้แก่

3.1 ไม้ผล ไม้ยืนต้น เช่น มะม่วง ลำไยทุเรียน ลองกอง ส้มเขียวหวาน ส้มโอ มะละกอ มะพร้าว ยางพารา ปาล์มน้ำมัน เป็นต้น มีวิธีการใช้ดังนี้

- การเพาะกล้า หรือการปักชำกิ่งพันธุ์ ใส่ปุ๋ยชีวภาพละลายฟอสเฟตอัตรา 10 กรัมต่อถุงเพาะ จากนั้นหยอดเมล็ดหรือปักชำกิ่งพันธุ์ลงในถุงเพาะ
- การรองก้นหลุม ใส่ปุ๋ยชีวภาพละลายฟอสเฟตอัตรา 10 กรัมต่อหลุม รองก้นหลุมก่อนปลูกพืช
- การโรยรอบทรงพุ่ม แบ่งตามอายุพืช ดังนี้
 - ไม้ผลอายุ 1-3 ปี ใช้ปุ๋ยชีวภาพละลายฟอสเฟตอัตรา 50-100 กรัมต่อต้น คลุกผสมกับปุ๋ยอินทรีย์ โรยรอบทรงพุ่มแล้วกลบดินทันที
 - ไม้ผลอายุ 3 ปีขึ้นไป ใช้ปุ๋ยชีวภาพละลายฟอสเฟตอัตรา 100-200 กรัมต่อต้น คลุกผสมกับปุ๋ยอินทรีย์ โรยรอบทรงพุ่มแล้วกลบดินทันที

3.2 พืชไร่ เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง อ้อย ถั่วเหลือง ถั่วลิสง งาม เป็นต้น มีวิธีการใช้ดังนี้

- การคลุกเมล็ด นำเมล็ดพืชที่ต้องการปลูก 5 กิโลกรัม ใส่ลงในภาชนะ จากนั้นผสมด้วยน้ำเปล่าให้ทั่ว จากนั้นโรยปุ๋ยชีวภาพละลายฟอสเฟตจำนวน 1 ถุง แล้วคลุกเมล็ดให้ทั่วก่อนนำไปปลูก
- การรองก้นหลุม ใช้ปุ๋ยชีวภาพละลายฟอสเฟตอัตรา 5 กิโลกรัมต่อไร่ คลุกผสมกับปุ๋ยอินทรีย์ 100 กิโลกรัม ให้เข้ากัน แล้วใช้รองก้นหลุมพร้อมปลูก

3.3 พืชผัก เช่น พริก มะเขือ มะเขือเทศ กระเจี๊ยบเขียว เป็นต้น มีวิธีการใช้ดังนี้

- การเพาะกล้าในกระบะเพาะชำ ใช้ปุ๋ยชีวภาพละลายฟอสเฟตจำนวน 1 ถุง คลุกผสมกับวัสดุเพาะ 50 กิโลกรัม ให้เข้ากัน จากนั้นนำไปใส่กระบะเพาะ แล้วจึงหยอดเมล็ด
- การรองก้นหลุม ใช้ปุ๋ยชีวภาพละลายฟอสเฟตอัตรา 5 กิโลกรัมต่อไร่ คลุกผสมกับปุ๋ยอินทรีย์ 100 กิโลกรัม ให้เข้ากัน แล้วใช้รองก้นหลุมพร้อมปลูก

ประโยชน์ของปุ๋ยชีวภาพกับการผลิตพืช

ตามพระราชบัญญัติปุ๋ย พ.ศ. 2518 แก้ไขเพิ่มเติมโดยพระราชบัญญัติปุ๋ย (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2550 ให้คำจำกัดความของปุ๋ยชีวภาพ ไว้ว่า “ปุ๋ยชีวภาพ หมายความว่า ปุ๋ยที่ได้จากการนำจุลินทรีย์ที่มีชีวิตที่สามารถสร้างธาตุอาหาร หรือช่วยให้ธาตุอาหารเป็นประโยชน์กับพืช มาใช้ในการปรับปรุงบำรุงดินทางชีวภาพ ทางกายภาพ หรือทางชีวเคมี และให้หมายความรวมถึงหัวเชื้อจุลินทรีย์” (พิรพงษ์, 2561)

ปุ๋ยชีวภาพจากไรโซแบคทีเรียมีประโยชน์ต่อพืชทั้งทางตรงและทางอ้อม (ดูหัวข้อ กลไกการทำงานของฟิสิกส์) โดยมีการนำมาใช้ในการผลิตพืชสำหรับเพิ่มผลผลิตพืช สามารถแบ่งปุ๋ยชีวภาพจากไรโซแบคทีเรียได้เป็น 3 ชนิด ดังนี้

1. ปุ๋ยชีวภาพไรโซเปียม ที่คลุกเมล็ดถั่วเหลืองก่อนปลูก ทั้งชนิดเหลืองและเขียวในไตรทสูง ร่วมกับปุ๋ยเคมีสูตร 12-24-12 อัตรา 25 กิโลกรัมต่อไร่ ส่งผลให้น้ำหนักบมรากแห้ง น้ำหนักต้นแห้ง และผลผลิตเมล็ดไม่แตกต่างกัน แต่เชื้อไรโซเปียมทนไนโตรเจนสูงมีประสิทธิภาพดีกว่าเชื้อไรโซเปียมปกติในสภาพที่ใช้ร่วมกับปุ๋ยเคมี (พรพรรณ และคณะ, 2554) แต่ถ้าในดินที่มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่ำ เชื้อไรโซเปียมไม่สามารถตรึงไนโตรเจนได้ดี จึงทำให้ต้นพืชแคระแกร็น (นันทกร และหนึ่ง, 2541) การใช้ปุ๋ยชีวภาพไรโซเปียมร่วมกับการปลูกพืชตระกูลถั่ว สามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตของต้นถั่วและทำให้ปริมาณไนโตรเจนในลำต้นถั่วเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังช่วยเพิ่มผลผลิตและปรับปรุงคุณภาพของเมล็ดถั่วได้ และทดแทนการใช้ปุ๋ยเคมีไนโตรเจนได้ร้อยละ 50 ขึ้นไป (จิตรรา และคณะ, 2561)

2. ปุ๋ยชีวภาพฟิสิกส์นิยมใช้แบคทีเรีย *Azospirillum* ร่วมกับแบคทีเรียสกุลอื่น ๆ ได้แก่ แบคทีเรีย *Azotobacter* *Beijerinckia* *Burkholderia* และ *Gluconacetobacter* เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของปุ๋ยชีวภาพฟิสิกส์สำหรับส่งเสริมการเติบโตของพืช (กัลยากร, 2561) ปุ๋ยชีวภาพฟิสิกส์มีบทบาทในการผลิตพืชปลูก เช่น ข้าวโพด ข้าว อ้อย และมันสำปะหลัง ดังนี้

2.1 ข้าวโพด คลุกปุ๋ยชีวภาพฟิสิกส์-วัน อัตรา 50 กรัมต่อเมล็ดพันธุ์ข้าวโพด 1 กิโลกรัม ก่อนปลูกร่วมกับใช้ปุ๋ยเคมีสูตร 15-15-15 อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ รองก้นหลุมพร้อมปลูก ใช้ปุ๋ยเคมีสูตร 46-0-0 อัตรา 25 กิโลกรัมต่อไร่ เมื่อข้าวโพดอายุ 20-25 วัน และใช้ปุ๋ยเคมีสูตร 13-13-21 อัตรา 25 กิโลกรัมต่อไร่ เมื่อข้าวโพดออกดอก (วิธี GAP) ทำให้ผลผลิตข้าวโพดไม่แตกต่างจากวิธีการใช้ปุ๋ยเคมีตามวิธี GAP ซึ่งเป็นวิธีการที่ให้ผลผลิตข้าวโพดสูงที่สุด แต่การใช้ปุ๋ยชีวภาพฟิสิกส์-วัน คลุกเมล็ดก่อนปลูกเพียงอย่างเดียว ทำให้ข้าวโพดไม่ให้ผลผลิต การใช้ปุ๋ยชีวภาพฟิสิกส์-วัน ร่วมกับปุ๋ยเคมี ยังช่วยลดการใช้ปุ๋ยเคมีลงร้อยละ 25 จาก

วิธี GAP (เอกพล และคณะ, 2559) นอกจากนี้เมื่อนำผลวิเคราะห์การใช้ปุ๋ยชีวภาพฟิสิกซ์-วัน ในดินร่วนปนทรายที่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุและฟอสฟอรัสต่ำ สามารถลดการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนและฟอสฟอรัสลงร้อยละ 50 ของอัตราแนะนำตามค่าวิเคราะห์ดินของกรมวิชาการเกษตร ในขณะที่เมื่อนำปุ๋ยชีวภาพฟิสิกซ์-วัน มาใช้ในดินร่วนเหนียวที่มีปริมาณฟอสฟอรัสสูง สามารถลดการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนและโพแทสเซียมลงร้อยละ 25 ของอัตราแนะนำตามค่าวิเคราะห์ดินของกรมวิชาการเกษตร (นิมิตร และพีระยศ, 2562)

2.2 ข้าว การใช้ปุ๋ยชีวภาพฟิสิกซ์-ทุ ร่วมกับปุ๋ยหมัก ปุ๋ยไนโตรเจนอัตรา 1.5 กิโลกรัมต่อไร่ และหินฟอสเฟตในสภาพดินต่าง ดินเหนียว ทำให้เพิ่มผลผลิตเมล็ดข้าวขึ้นร้อยละ 9.8 และลดการใช้ปุ๋ยเคมีลงร้อยละ 40 ของอัตราแนะนำตามค่าวิเคราะห์ดินของกรมวิชาการเกษตร นอกจากนี้การใช้ปุ๋ยชีวภาพฟิสิกซ์-ทุ ร่วมกับปุ๋ยเคมีช่วยเพิ่มผลผลิตข้าวขึ้นร้อยละ 40 และลดการใช้ปุ๋ยเคมีลงร้อยละ 35.8 (นิมิตร และพีระยศ, 2562) ประกอบกับการใช้ปุ๋ยชีวภาพฟิสิกซ์-ทุ ในการผลิตข้าวแบบอินทรีย์ร่วมกับการใช้ปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ดอัตรา 1,125 กิโลกรัมต่อไร่ ในดินทรายที่ไม่มีการปรับปรุงดินมาก่อน ทำให้การเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวสูงสุด และสามารถลดการใช้ปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ดลงได้ถึงร้อยละ 25 ของอัตราแนะนำ คือ การใช้ปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ดอัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่ โดยผลผลิตเพิ่มขึ้นร้อยละ 22 (จุฬามณี และอรุณ, 2563)

2.3 อ้อย การใช้ปุ๋ยชีวภาพฟิสิกซ์-ทรี กับอ้อยปลูก อ้อยต่อ 1 และอ้อยต่อ 2 ช่วยลดการใช้ปุ๋ยเคมีลงร้อยละ 25 หรือลดการใช้ปุ๋ยไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมลงร้อยละ 25 ของอัตราแนะนำตามค่าวิเคราะห์ดินของกรมวิชาการเกษตร และจากการติดตามการใช้ปุ๋ยชีวภาพฟิสิกซ์-ทรี ในกลุ่มเกษตรกรเป้าหมาย พบว่า การใช้ปุ๋ยชีวภาพฟิสิกซ์-ทรี สามารถลดการใช้ปุ๋ยได้ร้อยละ 33-43 (นิมิตร และพีระยศ, 2562)

2.4 มันสำปะหลัง การใช้ปุ๋ยชีวภาพฟิสิกซ์-ทรี ทำให้ผลผลิตหัวมันสดเพิ่มขึ้นร้อยละ 16.2 ซึ่งการใช้ปุ๋ยชีวภาพฟิสิกซ์-ทรี ร่วมกับการใช้ปุ๋ยไนโตรเจน สามารถลดการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนลงร้อยละ 50 ของอัตราแนะนำตามค่าวิเคราะห์ดินของกรมวิชาการเกษตร (นิมิตร และพีระยศ, 2562)

ปุ๋ยชีวภาพฟิสิกซ์ช่วยเพิ่มปริมาณรากร้อยละ 20 เนื่องจากแบคทีเรียในปุ๋ยชีวภาพฟิสิกซ์สามารถสร้างฮอร์โมนพืชในกลุ่มออกซิน (auxin) ซึ่งช่วยกระตุ้นการขยายขนาดของเซลล์รากพืช ทำให้รากพืชยาวและระบบรากแข็งแรง เพิ่มประสิทธิภาพในการดูดน้ำและปุ๋ยอย่างน้อยร้อยละ 15 ทำให้พืชแข็งแรงต้านทานโรค เพิ่มผลผลิตได้อย่างน้อยร้อยละ 10 สามารถลดการใช้ปุ๋ยเคมีได้ถึงร้อยละ 25 ของอัตราแนะนำตามค่าวิเคราะห์ดินของกรมวิชาการเกษตร (กัลยากร, 2561)

3. ปุ๋ยชีวภาพละลายฟอสเฟต ที่ใส่ในดินชุดปากช่อง อัตรา 64 กรัมต่อกิโลกรัมดิน มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในน้ำชะล้างสูงสุด 31.10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในระยะเวลา 90 วัน ที่ชะล้างผ่านคอลัมน์ดิน ถึงแม้ว่าจะมีการชะล้างอย่างต่อเนื่องแต่ยังพบปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์สูง แสดงให้เห็นว่าแบคทีเรียยังทำกิจกรรมการละลายฟอสเฟตและสามารถอยู่รอดในดินได้ ในขณะที่การใส่ปุ๋ยชีวภาพละลายฟอสเฟตร่วมกับการใช้ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดิน ส่งผลให้ผลผลิตและองค์ประกอบผลผลิตของอ้อยเพิ่มขึ้นตามอัตราการใช้ปุ๋ยชีวภาพที่เพิ่มขึ้น และอ้อยมีผลผลิตสูงสุดเมื่อใส่ปุ๋ยเคมีอัตรา 15-7.5-15 N-P₂O₅-K₂O กิโลกรัมต่อไร่ ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพละลายฟอสเฟตอัตรา 36 กิโลกรัมต่อไร่ (สิรินภา และชัยสิทธิ์, 2563) นอกจากนี้ปุ๋ยการใช้ปุ๋ยชีวภาพละลายฟอสเฟตช่วยลดการใช้ปุ๋ยฟอสเฟตได้ร้อยละ 25-50 เพิ่มความเป็นประโยชน์ของดินฟอสเฟต เพิ่มความแข็งแรงให้กับพืช และป้องกันการเข้าทำลายของโรครากเน่าหรือโคนเน่า (สุปราณี และคณะ, 2561)

การเก็บรักษาและข้อควรระวัง

การเก็บรักษาและข้อควรระวังปุ๋ยชีวภาพไรโซเบียม ปุ๋ยชีวภาพฟิซีฟิอาร์ และปุ๋ยชีวภาพละลายฟอสเฟต มีรายละเอียดดังนี้

1. ปุ๋ยชีวภาพไรโซเบียม ควรเก็บรักษาในที่เย็น ไม่โดนแสงแดด ที่อุณหภูมิ 8-10 องศาเซลเซียส และมีข้อควรระวัง (จิตรา และคณะ, 2561) ดังนี้

1.1 ควรเลือกใช้ปุ๋ยชีวภาพไรโซเบียมให้ตรงชนิดของถั่วที่ต้องการปลูก ซึ่งปุ๋ยชีวภาพไรโซเบียมแต่ละชนิดเหมาะสมกับถั่วที่ระบุไว้บนฉลากผลิตภัณฑ์เท่านั้น

1.2 ควรเลือกใช้ผลิตภัณฑ์ปุ๋ยชีวภาพไรโซเบียมที่ยังไม่หมดอายุ ซึ่งจะระบุอยู่บนฉลากผลิตภัณฑ์

1.3 ควรปลูกถั่วในขณะที่ดินมีความชื้นเหมาะสม หรือปลูกแล้วมีการให้น้ำทันที

2. ปุ๋ยชีวภาพฟิซีฟิอาร์ ควรเก็บรักษาในที่เย็น ไม่ให้โดนแสงแดด สารเคมี ความชื้น หากเก็บรักษาในที่อุณหภูมิต่ำกว่า 25 องศาเซลเซียส จะช่วยยืดอายุการเก็บรักษาได้ เมื่อเปิดใช้แล้วควรใช้ให้หมดทันที นอกจากนี้การใช้ปุ๋ยชีวภาพฟิซีฟิอาร์ให้เกิดประสิทธิภาพและช่วยส่งเสริมการเติบโตของพืช (กัลยากร, 2561) ควรพิจารณาตามรายละเอียดดังนี้

2.1 ควรเลือกใช้ปุ๋ยชีวภาพฟิซีฟิอาร์ให้ตรงกับพืชที่ต้องการปลูก ตามที่ระบุไว้บนฉลากผลิตภัณฑ์

2.2 ควรเลือกใช้ผลิตภัณฑ์ปุ๋ยชีวภาพฟิซีฟิอาร์ที่ยังไม่หมดอายุ ซึ่งจะระบุอยู่บนฉลากผลิตภัณฑ์

2.3 เมื่อเปิดใช้ปุ๋ยชีวภาพฟิซีฟิอาร์แล้ว ควรใช้ให้หมดทันที

3. ปุ๋ยชีวภาพละลายฟอสเฟต ควรเก็บรักษาในที่เย็น ไม่โดนแสงแดด ที่อุณหภูมิ 4-10 องศาเซลเซียส และมีข้อควรระวัง คือ ควรเลือกใช้ผลิตภัณฑ์ปุ๋ยชีวภาพละลายฟอสเฟตที่ยังไม่หมดอายุ ซึ่งจะระบุอยู่บนฉลากผลิตภัณฑ์ (สุปราณี และคณะ, 2561)

สรุป

พบไรโซแบคทีเรียส่งเสริมการเติบโตของพืช (ฟิซีฟิอาร์) อาศัยอยู่ทั้งภายในและภายนอกเซลล์รากพืชในเขตอิทธิพลรากพืช มีคุณสมบัติที่สำคัญหลายชนิด ได้แก่ การตรึงไนโตรเจน การละลายฟอสเฟต การละลายโพแทสเซียม การผลิตฮอร์โมนพืช การเจริญของรากพืช การผลิตสารปฏิชีวนะ การผลิตไซโตไคน์ การทนทานต่อสภาพแวดล้อม และการทนทานต่อโลหะหนัก ด้วยคุณสมบัติดังกล่าวฟิซีฟิอาร์จึงถูกนำมาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ปุ๋ยชีวภาพโดยกรมวิชาการเกษตร 3 ชนิด ได้แก่ 1) ปุ๋ยชีวภาพไรโซเบียม 2) ปุ๋ยชีวภาพฟิซีฟิอาร์ 3 ชนิด ได้แก่ ปุ๋ยชีวภาพฟิซีฟิอาร์-วัน (สำหรับข้าวโพดและข้าวฟ่าง) ปุ๋ยชีวภาพฟิซีฟิอาร์-ทู (สำหรับข้าว) และปุ๋ยชีวภาพฟิซีฟิอาร์-ทรี (สำหรับอ้อยและมันสำปะหลัง) และ 3) ปุ๋ยชีวภาพละลายฟอสเฟต เมื่อนำไปใช้ในการผลิตพืชตามคำแนะนำสามารถลดการใช้ปุ๋ยเคมีได้ร้อยละ 50 (ปุ๋ยชีวภาพไรโซเบียม) 25 (ปุ๋ยชีวภาพฟิซีฟิอาร์) และ 25-50 (ปุ๋ยชีวภาพละลายฟอสเฟต) นอกจากนี้การใช้ปุ๋ยชีวภาพยังช่วยเพิ่มความแข็งแรงและเพิ่มผลผลิตพืช ซึ่งการเลือกซื้อผลิตภัณฑ์ปุ๋ยชีวภาพควรดูวันหมดอายุ วิธีการเก็บรักษา และเลือกใช้งานให้เหมาะสมกับชนิดพืชตามที่ระบุไว้บนฉลากผลิตภัณฑ์

เอกสารอ้างอิง

- กัลยากร โปร่งจันทิก. (2561). ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับปุ๋ยชีวภาพฟิสิกส์ฟาร์. ใน *เอกสารประกอบการฝึกอบรม หลักสูตร การใช้ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินในการผลิตพืชเศรษฐกิจและการจัดการธาตุอาหารพืชในการผลิตพืชอินทรีย์* (น. 25-29). กรุงเทพฯ: กลุ่มวิจัยปฐพีวิทยา กองวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร กรมวิชาการเกษตร.
- จิตรา เกาะแก้ว, มนต์ชัย มนต์ศิลา และ อมรรัตน์ ใจยะเสน. (2561). ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับปุ๋ยชีวภาพไรโซเบียม. ใน *เอกสารประกอบการฝึกอบรม หลักสูตร การใช้ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินในการผลิตพืชเศรษฐกิจและการจัดการธาตุอาหารพืชในการผลิตพืชอินทรีย์* (น. 21-24). กรุงเทพฯ: กลุ่มวิจัยปฐพีวิทยา กองวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร กรมวิชาการเกษตร.
- จุฬามณี สุริยะภูมิ และ อรุณี พรหมคำบุตร. (2563). อิทธิพลของ PGPR ต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวที่ปลูกแบบอินทรีย์. *แก่นเกษตร*, 48(ฉบับพิเศษ 1), 547-554.
- ดุสิต อธิวัฒน์. (2556). จุลินทรีย์ที่มีประโยชน์ด้านการเกษตร. *Thai Journal of Science and Technology*, 2(1), 18-35.
- นันทกร บุญเกิด และ หนึ่ง เตียอำรุง. (2541). รายงานการวิจัย การใช้ปุ๋ยชีวภาพไรโซเบียมและไมโครไรซาเพื่อเพิ่มผลผลิตพืชตระกูลถั่วที่ใช้เป็นอาหารสัตว์. นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- นิมิตร วงศ์สุวรรณ และ พีระยศ แข็งขัน. (2562). ประโยชน์ของปุ๋ยชีวภาพฟิสิกส์ฟาร์ในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพืชเศรษฐกิจ. *วารสารเกษตรพระวรุณ*, 16(1), 19-33.
- พิรพงษ์ เขาวนพงษ์. (2561). ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับปุ๋ยอินทรีย์ และความเป็นประโยชน์ธาตุอาหารพืชจากปุ๋ยอินทรีย์. ใน *เอกสารประกอบการฝึกอบรม หลักสูตร การใช้ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินในการผลิตพืชเศรษฐกิจและการจัดการธาตุอาหารพืชในการผลิตพืชอินทรีย์* (น. 9-20). กรุงเทพฯ: กลุ่มวิจัยปฐพีวิทยา กองวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร กรมวิชาการเกษตร.
- พรพรรณ สุทธิแย้ม, อัจฉรา นันทกิจ, ศิริลักษณ์ จิตรอักษร, จิตมา ยถาภูษานนท์ และ สมชาย ฝะอบเหล็ก. (2554). การใช้เชื้อไรโซเบียมร่วมกับปุ๋ยเคมีและปุ๋ยอินทรีย์เพื่อเพิ่มผลผลิตและโปรตีนในถั่วเหลือง. *แก่นเกษตร*, 39(ฉบับพิเศษ 3), 113-122.
- สิรินภา ช่วงโอภาส และ ชัยสิทธิ์ ทองจุ. (2563). ผลของการใช้บาซิลลัสลัสลายฟอสเฟตร่วมกับปุ๋ยเคมีต่อผลผลิตและองค์ประกอบผลผลิตของอ้อยในชุดดินปากช่อง. *วารสารเกษตร*, 36(2), 187-196.
- สุปราณี มั่นหมาย, อธิปตย์ คลังบุญครอง และ สนธยา ขำดีบ. (2561). ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับปุ๋ยชีวภาพฟิสิกส์ฟาร์. ใน *เอกสารประกอบการฝึกอบรม หลักสูตร การใช้ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินในการผลิตพืชเศรษฐกิจและการจัดการธาตุอาหารพืชในการผลิตพืชอินทรีย์* (น. 34-38). กรุงเทพฯ: กลุ่มวิจัยปฐพีวิทยา กองวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร กรมวิชาการเกษตร.
- สำนักงานราชบัณฑิตยสภา. (2562). *พจนานุกรมศัพท์ปฐพีศาสตร์ ฉบับราชบัณฑิตยสภา*. กรุงเทพฯ: บริษัทอมรินทร์พริ้นติ้งแอนด์พับลิชชิ่ง จำกัด (มหาชน).
- หนึ่ง เตียอำรุง, กมลลักษณ์ เทียมไธสง และ นันทกร บุญเกิด. (2548). ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับ PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria). *วารสารเทคโนโลยีสุรนารี*, 12(3), 252-261.
- หนึ่ง เตียอำรุง และ นันทกร บุญเกิด. (2539). ธาตุเหล็ก ซีเดอร์โรเฟอร์ และ จุลินทรีย์. *วารสารเทคโนโลยีสุรนารี*, 3(2), 95-100.

- เอกพล ธรรมนุส, ธนวัฒน์ เสนเผือก, อรุณทิพย์ เหมะตุลิน, สุรศักดิ์ บุญแต่ง และ สกฤตกานต์ สิมลา. (2559). ผลของปุ๋ยชีวภาพฟิสิกส์อาร์ 1 ร่วมกับปุ๋ยเคมีต่อผลผลิตเมล็ดของข้าวโพดข้าวเหนียวสีม่วง. *วารสารพืชศาสตร์สงขลานครินทร์*, 3(ฉบับพิเศษ 3), 54-59.
- Ahemad, M. & Kibret, A. (2014). Mechanisms and applications of plant growth promoting rhizobacteria: Current perspective. *Journal of King Saud University*, 26(1), 1-20.
- Arora, N.K., Fatima, T., Mishra, J., Mishra, I., Verma, S., Verma, R., Verma, M., Bhattacharya, A., Verma, P., Mishra, P. & Bharti, C. (2020). Halo-tolerant plant growth promoting rhizobacteria for improving productivity and remediation of saline soils. *Journal of Advanced Research*, 26, 69-82.
- Asif, M., Pervez, A., Irshad, U., Mehmood, Q. & Ahmad, R. (2020). Melatonin and plant growth-promoting rhizobacteria alleviate the cadmium and arsenic stresses and increase the growth of *Spinacia oleracea* L. *Plant, Soil and Environment*, 66(5), 234-241.
- Avis, T.J., Gravel, V., Antoun, H. & Tweddell, R.J. (2008). Multifaceted beneficial effects of rhizosphere microorganisms on plant health and productivity. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(7), 1733-1740.
- Bardi, D.V. & Vivanco, J.M. (2009). Regulation and function of root exudates. *Plant, Cell and Environment*, 32(6), 666-681.
- Batool, T., Ali, S., Seleiman, M.F., Naveed, N.H., Ali, A., Ahmed, K., Abid, M., Rizwan, M., Shahid, M.R., Alotaibi, M., Al-Ashkar, I. & Mubushar, M. (2020). Plant growth promoting rhizobacteria alleviates drought stress in potato response to suppressive oxidative stress and antioxidant enzymes activities. *Scientific Reports*, 10, doi:10.1038/s41598-020-73489-z.
- Beneduzi, A., Ambrosini, A. & Passaglia, L.M.P. (2012). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): Their potential as antagonists and biocontrol agents. *Genetics and Molecular Biology*, 35(4 suppl.), 1044-1051.
- Bhattacharyya, P.N. & Jha, D.K. (2012). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): emergence in agriculture. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 28(4), 1327-1350.
- Cardón, D.L., Villafán, S.M., Tovar, A.R., Jiménez, S.P., Zúñiga, L.A.G., Allieri, M.A.A., Pérez, N.O. & Dortes, A.R. (2010). Growth response and heavy metals tolerance of *Axonopus affinis*, inoculated with plant growth-promoting rhizobacteria. *African Journal of Biotechnology*, 9(51), 8772-8782.
- Erturk, Y., Ercisli, S., Haznedar, A. and Cakmakci, R. (2010). Effects of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) on rooting and root growth of kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) stem cutting. *Biological Research*, 43(1), 91-98.
- Etesami, H., Emami, S. & Alikhani, H.A. (2017). Potassium solubilizing bacteria (KSB): Mechanisms, promotion of plant growth, and the future prospects - a review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 17(4), 897-911.

- Glick, B.R. (1995). The enhancement of plant growth by free-living bacteria. *Canadian Journal of Microbiology*, 41(2), 109-117.
- Glick, B.R., Patten, C.L., Holguin, G. & Penrose, D.M. (1999). *Biochemical and Genetic Mechanisms Used by Plant Growth Promoting Bacteria*. London, UK: Imperial College Press.
- Goswami, D., Thakker, J.N. & Dhandhukia, P.C. (2016). Portraying mechanics of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): A review. *Cogent Food & Agriculture*, 2(1), doi:10.1080/23311932.2015.1127500.
- Goswami, M. & Deka, S. (2020). Plant growth-promoting rhizobacteria—alleviators of abiotic stresses in soil: A review. *Pedosphere*, 30(1), 40-61.
- Gouda, S., Kerry, R.G., Das, G., Paramithiotis, S. & Shin, H.-S. (2018). Revitalization of plant growth promoting rhizobacteria for sustainable development in agriculture. *Microbiological Research*, 206, 131-140.
- Gray, E.J. & Smith, D.L. (2005). Intracellular and extracellular PGPR: commonalities and distinctions in the plant—bacterium signaling processes. *Soil Biology & Biochemistry*, 37(3), 395-412.
- Hayat, R., Ali, S., Amara, U., Khalid, R. & Ahmed, I. (2010). Soil beneficial bacteria and their role in plant growth promotion: a review. *Annals of Microbiology*, 60(4), 579-598.
- Hopkins, W.G. & Hüner, N.P.A. (2009). *Introduction to Plant Physiology* (4th ed.). New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Ilangumaran, G. & Smith, D.L. (2017). Plant growth promoting rhizobacteria in amelioration of salinity stress: A systems biology perspective. *Frontiers in Plant Science*, 8, doi:10.3389/fpls.2017.01768.
- Ipek, M., Pirlak, L., Esitken, A., Dönmez, M.F., Turan, M. & Sahin, F. (2014). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) increase yield, growth and nutrition of strawberry under high-calcareous soil conditions. *Journal of Plant Nutrition*, 37(7), 990-1001.
- Jaiswal, D.K., Verma, J.P., Prakash, S., Meena, V.S. & Meena, R.S. (2016). Potassium as an important plant nutrient in sustainable agriculture: A state of the art. In V.S. Meena, B.R. Maurya, J.P. Verma and R.S. Meena (Eds.), *Potassium Solubilizing Microorganisms for Sustainable Agriculture* (pp. 21-29). India: Springer India.
- Joo, G.-J., Kim, Y.-M., Kim, J.-T., Rhee, I.-K., Kim, J.-H. & Lee, I.-J. (2005). Gibberellins-producing rhizobacteria increase endogenous gibberellins content and promote growth of red peppers. *The Journal of Microbiology*, 43(6), 510-515.
- Kang, S.-M., Khan, A.L., Waqas, M., Asaf, S., Lee, K.-E., Park, Y.-G., Kim, A.-Y., Khan, M.A., You, Y.-H. & Lee, I.-J. (2019). Integrated phytohormone production by the plant growth-promoting rhizobacterium *Bacillus tequilensis* SSB07 induced thermotolerance in soybean. *Journal of Plant Interactions*, 14(1), 416-423.
- Kaushal, M. & Wani, S.P. (2015). Plant-growth-promoting rhizobacteria: drought stress alleviators to ameliorate crop production in drylands. *Annals of Microbiology*, 66(1), 35-42.

- Khan, A., Singh, P. & Srivastava, A. (2018). Synthesis, nature and utility of universal iron chelator – Siderophore: A review. *Microbiological Research*, 212-213, 103-111.
- Khanna, K., Jamwal, V.L., Gandhi, S.G., Ohri, P. & Bhardwaj, R. (2019). Metal resistant PGPR lowered Cd uptake and expression of metal transporter genes with improved growth and photosynthetic pigments in *Lycopersicon esculentum* under metal stress. *Scientific Reports*, 9(1), doi:10.1038/s41598-019-41899-3.
- Kloepper, J.W. & Schroth, M.N. (1981). Relationship of in vitro antibiosis of plant growth-promoting rhizobacteria to plant growth and the displacement of root microflora. *Phytopathology*, 71(10), 1020-1024.
- Kuan, K.B., Othman, R., Rahim, K.A. & Shamsuddin, Z.H. (2016). Plant growth-promoting rhizobacteria inoculation to enhance vegetative growth, nitrogen fixation and nitrogen remobilisation of maize under greenhouse conditions. *PLoS One*, 11(3), doi:10.1371/journal.pone.0152478.
- Kudoyarova, G., Arkhipova, T., Korshunova, T., Bakaeva, M., Loginov, O. & Dodd, I.C. (2019). Phytohormone mediation of interactions between plants and non-symbiotic growth promoting bacteria under edaphic stresses. *Frontiers in Plant Science*, 10, doi:10.3389/fpls.2019.01368.
- Kumar, A., Patel, J.S., Meena, V.S. & Srivastava, R. (2019). Recent advances of PGPR based approaches for stress tolerance in plants for sustainable agriculture. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 20, 101271. doi:10.1016/j.bcab.2019.101271.
- Laranjo, M., Alexandre, A. & Oliveira, S. (2014). Legume growth-promoting rhizobia: An overview on the *Mesorhizobium* genus. *Microbiological Research*, 169(1), 2-17.
- Li, K., Chen, W.-H. & Bruner, S.D. (2016). Microbial siderophore-based iron assimilation and therapeutic applications. *Biometals*, 29(3), 377-388.
- Liu, F., Xiang, S., Ma, H., Du, Z. & Ma, B. (2013). Cytokinin-producing, plant growth-promoting rhizobacteria that confer resistance to drought stress in *Platycladus orientalis* container seedlings. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 97(20), 9155-9164.
- Lynch, J.M. & Whipps, J.M. (1990). Substrate flow in the rhizosphere. *Plant and Soil*, 129(1), 1-10.
- Martinez-Viveros, O., Jorquera, M.A., Crowley, D.E., Gajardo, G. & Mora, M.L. (2010). Mechanisms and practice considerations involved in plant growth promotion by rhizobacteria. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 10(3), 293-319.
- Meena, V.S., Bahadur, I., Maurya, B.R., Kumar, A., Meena, R.K., Meena, S.K. & Verma, J.P. (2016). Potassium-solubilizing microorganism in evergreen agriculture: An overview. In V.S. Meena, B.R. Maurya, J.P. Verma and R.S. Meena (Eds.), *Potassium Solubilizing Microorganisms for Sustainable Agriculture* (pp. 1-20). India: Springer India.
- Mekonnen, H. & Kibret, M. (2021). The roles of plant growth promoting rhizobacteria in sustainable vegetable production in Ethiopia. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 8, doi:10.1186/s40538-021-00213-y.

- Miethke, M. (2013). Molecular strategies of microbial iron assimilation: from high-affinity complexes to cofactor assembly systems. *Metallomics*, 5(1), 15-28.
- Mittal, P., Kamle, M., Sharma, S., Choudhary, P., Rao, D.P. & Kumar, P. (2017). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): Mechanism, role in crop improvement and sustainable agriculture. In H.B. Singh, B.K. Sarma and C. Keswani (Eds.), *Advances in PGPR Research* (pp. 386-397). Wallingford, Oxfordshire, UK: CABI.
- Noumavo, P.A., Kochoni, E., Didagbé, Y.O., Adjanohoun, A., Allagbé, M., Sikirou, R., Gachomo, E.W., Kotchoni, S.O. & Baba-Moussa, L. (2013). Effect of different plant growth promoting rhizobacteria on maize seed germination and seedling development. *American Journal of Plant Sciences*, 4(5), 1013-1021.
- Ortiz-Ojeda, P., Ogata-Gutiérrez, K. & Zúñiga-Dávila, D. (2017). Evaluation of plant growth promoting activity and heavy metal tolerance of psychrotrophic bacteria associated with maca (*Lepidium meyenii* Walp.) rhizosphere. *AIMS Microbiology*, 3(2), 279-292.
- Pereira, S.I.A., Abreu, D., Moreira, H., Vega, A. & Castro, P.M.L. (2020). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) improve the growth and nutrient use efficiency in maize (*Zea mays* L.) under water deficit conditions. *Heliyon*, 6(10), doi:10.1016/j.heliyon.2020.e05106.
- Prasad, M., Srinivasan, R., Chaudhary, M., Choudhary, M. & Jat, L.K. (2019). Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) for sustainable agriculture: Perspectives and challenges. In A.K. Singh, A. Kumar and P.K. Singh (Eds.), *PGPR Amelioration in Sustainable Agriculture: Food Security and Environmental Management* (pp. 129-157). Oxford, UK: Woodhead Publishing.
- Prashar, P., Kapoor, N. & Sachdeva, S. (2013). Rhizosphere: its structure, bacterial diversity and significance. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 13(1), 63-77.
- Rajendran, S.K. & Sundaram, L. (2020). Degradation of heavy metal contaminated soil using plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): Assess their remediation potential and growth influence of *Vigna radiata* L. *International Journal of Agricultural Technology*, 16(2), 365-376.
- Reddy, P.P. (2014). *Plant Growth Promoting Rhizobacteria for Horticultural Crop Protection*. New Delhi, India: Springer.
- Ryu, C.-M., Murphy, J.F., Mysore, K.S. & Kloepper, J.W. (2004). Plant growth-promoting rhizobacteria systemically protect *Arabidopsis thaliana* against *Cucumber mosaic virus* by a salicylic acid and NPR1-independent and jasmonic acid-dependent signaling pathway. *The Plant Journal*, 39(3), 381-392.
- Saleem, M., Arshad, M., Hussain, S. & Bhatti, A.S. (2007). Perspective of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) containing ACC deaminase in stress agriculture. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 34(10), 635-648.

- Sarkar, J., Chakraborty, B. & Chakraborty, U. (2018). Plant growth promoting rhizobacteria protect wheat plants against temperature stress through antioxidant signalling and reducing chloroplast and membrane injury. *Journal of Plant Growth Regulation*, 37(4), 1396-1412.
- Shaikh, S.S., Wani, S. & Sayyed, R.Z. (2018). Impact of interactions between rhizosphere and rhizobacteria: A review. *Journal of Bacteriology and Mycology*, 5(1), 1058.
- Shukla, A.K. (2019). Ecology and diversity of plant growth promoting rhizobacteria in agricultural landscape. In A.K. Singh, A. Kumar and P.K. Singh (Eds.), *PGPR Amelioration in Sustainable Agriculture: Food Security and Environmental Management* (pp. 1-15). Oxford, UK: Woodhead Publishing.
- Tiwari, S. & Lata, C. (2018). Heavy metal stress, signaling, and tolerance due to plant-associated microbes: An overview. *Frontiers in Plant Science*, 9, doi:10.3389/fpls.2018.00452.
- Tsukanova, K.A., Chebotar, V.K., Meyer, J.J.M. & Bibikova, T.N. (2017). Effect of plant growth-promoting rhizobacteria on plant hormone homeostasis. *South African Journal of Botany*, 113, 91-102.
- Vacheron, J., Desbrosses, G., Bouffaud, M.-L., Touraine, B., Moënné-Loccoz, Y., Muller, D., Legendre, L., Wisniewski-Dyé, F. & Prigent-Combaret, C. (2013). Plant growth-promoting rhizobacteria and root system functioning. *Frontiers in Plant Science*, 4, doi:10.3389/fpls.2013.00356.
- Verma, J.P., Yadav, J., Tiwari, K.N., Lavakush & Singh, V. (2010). Impact of plant growth promoting rhizobacteria on crop production. *International Journal of Agricultural Research*, 5(11), 954-983.
- Vessey, J.K. (2003). Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant and Soil*, 255(2), 571-568.
- Vijayabharathi, R., Sathya, A. & Gopalakrishnan, S. (2016). A renaissance in plant growth-promoting and biocontrol agents by endophytes. In D.P. Singh, H.B. Singh and R. Prabha (Eds.), *Microbial Inoculants in Sustainable Agricultural Productivity, Vol. 1: Research Perspectives* (pp. 37-60). New Delhi, India: Springer.
- Vives-Peris, V., de Ollas, C., Gómez-Cadenas, A. & Pérez-Clemente, R.M. (2020). Root exudates: from plant to rhizosphere and beyond. *Plant Cell Reports*, 39(1), 3-17.
- Wani, P.A., Zaidi, A. & Khan, M.S. (2009). Chromium reducing and plant growth promoting potential of *Mesorhizobium* species under chromium stress. *Bioremediation Journal*, 13(3), 121-129.
- Wani, P.A., Khan, M.S. & Zaidi, A. (2008). Impact of zinc-tolerant plant growth-promoting rhizobacteria on lentil grown in zinc-amended soil. *Agronomy for Sustainable Development*, 28(3), 449-455.
- Wani, S.P. & Gopalakrishnan, S. (2019). Plant growth-promoting microbes for sustainable agriculture. In R.Z. Sayyed, M.S. Reddy and S. Antonius (Eds.), *Plant Growth Promoting Rhizobacteria*

- (PGPR): *Prospects for Sustainable Agriculture* (pp. 19-45). Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd.
- Weil, R.R. & Beady, N.C. (2017). *The Nature and Properties of Soils* (15th ed.). Essex, England: Pearson Education Limited.
- York, L.M., Carminati, A., Mooney, S.J., Ritz, K. & Bennett, M.J. (2016). The holistic rhizosphere: integrating zones, processes, and semantics in the soil influenced by roots. *Journal of Experimental Botany*, 67(12), 3629-3643.
- Yousef, N.M.H. (2018). Capability of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) for producing indole acetic acid (IAA) under extreme conditions. *European Journal of Biological Research*, 8(4), 174-182.
- Zahir, Z.A., Ghani, U., Naveed, M., Nadeem, S.M. & Asghar, H.N. (2009). Comparative effectiveness of *Pseudomonas* and *Serratia* sp. Containing ACC-deaminase for improving growth and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) under salt-stressed conditions. *Archives of Microbiology*, 191(5), 415-424.
- Zhang, F., Dashti, N., Hynes, R.K. & Smith, D.L. (1996). Plant growth promoting rhizobacteria and soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] nodulation and nitrogen fixation at suboptimal root zone temperatures. *Annals of Botany*, 77(5), 453-460.
- Zhang, S., Moyne, A.-L., Reddy, M.S. & Kloepper, J.W. (2002). The role of salicylic acid in induced systemic resistance elicited by plant growth-promoting rhizobacteria against blue mold of tobacco. *Biological Control*, 25(3), 288-296.