



DOI:10.22144/ctujos.2025.235

PHÂN BÓN VI SINH TỪ VI KHUẨN - GIẢI PHÁP GIẢM PHỤ THUỘC VÀ TĂNG HIỆU QUẢ SỬ DỤNG PHÂN HOÁ HỌC TRONG CANH TÁC BỀN VỮNG

Phan Thị Ngọc Nhanh^{1,2}, Nguyễn Quốc Khương³, Nguyễn Trọng Hồng Phúc⁴, Đỗ Thị Xuân^{1*}, Lý Ngọc Thanh Xuân², Trần Chí Nhân² và Mai Chí Bảo²

¹Viện Công nghệ Sinh học và Thực phẩm, Đại học Cần Thơ, Việt Nam

²Trường Đại học An Giang, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

³Trường Nông nghiệp, Đại học Cần Thơ, Việt Nam

⁴Trường Đại học Y dược Cần Thơ, Việt Nam

*Tác giả liên hệ (Corresponding author): dtxuan@ctu.edu.vn

Thông tin chung (Article Information)

Nhận bài (Received): 31/07/2025

Sửa bài (Revised): 12/11/2025

Duyệt đăng (Accepted): 12/12/2025

Title: Microbial fertilizer from bacteria - An alternative solution to chemical fertilizers in sustainable farming

Author: Phan Thi Ngoc Nhanh^{1,2}, Nguyen Quoc Khuong³, Nguyen Trong Hong Phuc⁴, Do Thi Xuan^{1*}, Ly Ngoc Thanh Xuan², Tran Chi Nhan² and Mai Chi Bao²

Affiliation(s): ¹Institute of Food and Biotechnology, Can Tho University, Viet Nam; ²An Giang University, National University–Ho Chi Minh City, Viet Nam; ³College of Agriculture, Can Tho University, Viet Nam; ⁴Can Tho University of Medicine and Pharmacy, Viet Nam

TÓM TẮT

Phân hóa học vẫn chiếm tỷ trọng lớn trong canh tác nông nghiệp ở Việt Nam do hiệu quả nhanh, dễ sử dụng và phổ biến rộng rãi; nhưng việc sử dụng phân bón hóa học kéo dài đã gây ra nhiều hệ lụy nghiêm trọng cho sức khỏe đất, môi trường, con người và hệ sinh thái. Phân bón vi sinh chứa các dòng vi sinh vật có lợi như vi khuẩn có khả năng cố định đạm, phân giải lân và kali, sản xuất chất kích thích tăng trưởng thực vật và chống stress cho cây trồng được xem là giải pháp thay thế bền vững, giúp giảm lượng phân hóa học, tăng hiệu quả sử dụng phân bón, cải thiện khả năng hấp thu dưỡng chất, cấu trúc đất và tăng năng suất cây trồng. Tuy nhiên, còn nhiều vấn đề phải đối mặt để phân bón vi sinh có thể được ứng dụng rộng rãi trong canh tác nông nghiệp hiện nay. Do đó, nghiên cứu được thực hiện với mục tiêu tổng hợp một số kết quả ứng dụng vi khuẩn có lợi và thách thức sử dụng phân bón vi sinh trong canh tác nông nghiệp theo hướng an toàn và thích ứng với biến đổi khí hậu.

Từ khóa: Cố định đạm, phân bón hoá học, phân bón vi sinh từ vi khuẩn, phân giải lân

ABSTRACT

Chemical fertilizers account for a large proportion of agricultural practices in Vietnam due to their rapid effectiveness, ease of use, and widespread availability; however, prolonged use of these chemicals affects soil health, human well-being, and overall ecosystem integrity. Biofertilizers contain beneficial microorganisms such as bacteria that can fix nitrogen, dissolve phosphorus and potassium, produce plant growth stimulants, and prevent stress for crops. They are considered a sustainable alternative to reduce chemical fertilizer inputs, increase the efficiency of fertilizer use, improve nutrient absorption and soil structure, and increase crop yields. However, the application of biofertilizers in agricultural cultivation is currently facing many challenges. Therefore, the study was conducted to synthesize some results of applying beneficial bacteria and the challenges of using microbial fertilizers in agricultural cultivation in a safe and climate change-adaptive direction.

Keywords: Bacterial biofertilizers, chemical fertilizers, nitrogen fixation, phosphate solubilization

1. GIỚI THIỆU

Việc sử dụng phân bón hoá học là nhu cầu cần thiết để cải thiện năng suất cây trồng, đảm bảo an ninh lương thực ở hầu hết các quốc gia (Prashar et al., 2025) và Việt Nam đang sử dụng với mức phân bón hoá học cao gấp 3 lần trung bình của thế giới (Vietnam Academy of Agricultural Sciences (VAAS), 2024). Tuy nhiên, phân hoá học khi được sử dụng, đặc biệt là phân đạm (N) đã tăng gánh nặng cho khí hậu, với hệ số phát thải khí nhà kính N_2O của phân urea là 0,72% (Grace et al., 2023). Đồng thời, việc sử dụng quá nhiều phân bón hóa học và sử dụng trong thời gian dài đã làm thay đổi các đặc tính lý, hóa đất như giảm giá trị pH đất, tạo ra nhiều tế bào khổng to trong đất, từ đó tăng tính thấm nhưng giảm khả năng giữ nước và chất dinh dưỡng của đất, do phân urea làm suy yếu lực tương tác giữa các hạt keo đất nên các tính hợp đất có xu hướng kết nối thành các khối lớn hơn, tạo ra nhiều tế bào khổng to trong đất (Zhang et al., 2019; Tripathi et al., 2022; Feng et al., 2023). Phân N khi được bón dài hạn không chỉ gây giảm độ pH đất mà còn làm giảm hoạt động của enzyme đất, đồng thời giảm mật độ vi khuẩn và mức độ biểu hiện gen *nifH* của vi khuẩn cố định đạm, gen *amoA-AOA*, *amoA-AOB* và *qnorB* của nhóm vi khuẩn cố tham gia tiến trình nitrate hoá và khử nitrate (Zhang et al., 2024a). Việc bón phân hoá học liên tục mà không chú ý tận dụng nguồn phân hữu cơ truyền thống (phân chuồng, than bùn, rác thải thực vật) hoặc phân bón hữu cơ thương mại đã gây suy giảm đa dạng vi sinh vật, ức chế các dòng có lợi như vi khuẩn cố định N_2 , vi khuẩn phân giải lân, nấm rễ cộng sinh, và làm tăng nhóm vi sinh vật gây bệnh; đồng thời gây mất cân bằng dinh dưỡng, ảnh hưởng đến khả năng hấp thụ của cây trồng và suy giảm độ phì nhiêu của đất (Zhou et al., 2017). Đây là những nguyên nhân dẫn đến bạc màu đất và giảm hiệu suất sử dụng dinh dưỡng của cây mặc dù bón thừa phân hóa học. Trong bối cảnh biến đổi khí hậu ngày càng diễn biến phức tạp, ô nhiễm môi trường và suy thoái đất canh tác do lạm dụng phân hoá học đang trở thành những vấn đề đáng lo ngại. Do đó, việc thay thế một phần phân bón hóa học bằng phân bón vi sinh được xem là một trong những giải pháp cốt lõi giúp giảm thiểu tác động tiêu cực đến môi trường, đồng thời vẫn đảm bảo năng suất cây trồng, chất lượng nông sản và lợi nhuận kinh tế (Food and Agriculture Organization (FAO), 2021). Phân bón vi sinh với thành phần là các vi sinh vật có lợi không

chỉ tăng tính đa dạng của quần thể vi sinh vật trong đất, tăng độ phì nhiêu của đất mà còn có khả năng cố định nitơ (N_2), phân giải lân (P), kali (K) trong đất và cung cấp các chất điều hòa sinh trưởng cho cây trồng (Wei et al., 2024). Sự phát triển của phân bón vi sinh đang mở ra hướng đi mới cho nền nông nghiệp bền vững, thân thiện với môi trường và an toàn với sức khỏe con người. Trong khi những tiến bộ khoa học đã giúp tuyển chọn chủng vi sinh vật mạnh hơn, chịu stress tốt hơn và ứng dụng công nghệ đóng sản xuất giúp tăng khả năng sống của vi sinh vật trong đất, phân bón vi sinh vẫn còn nhiều tồn tại như hiệu quả không ổn định giữa các vùng đất, tương tác phức tạp với vi sinh vật bản địa, tính nhạy cảm với điều kiện môi trường và rào cản về tiêu chuẩn chất lượng trong sản xuất và kinh doanh (Backer et al., 2018; Compant et al., 2019). Hơn nữa, nông dân duy trì thói quen sử dụng dư thừa phân bón hoá học khiến cho hiệu quả của phân vi sinh khó có thể hiện đầy đủ, thậm chí có thể gây phản tác dụng nếu môi trường đất không phù hợp cho vi sinh vật hoạt động. Do đó, nghiên cứu tổng quan này được thực hiện nhằm tổng hợp và phân tích các kết quả nghiên cứu về vai trò, cơ chế hoạt động, hiệu quả của phân bón vi sinh, công nghệ sản xuất và những tồn tại cần khắc phục. Điều này góp phần định hướng sử dụng phân bón vi sinh như một giải pháp giảm phụ thuộc vào phân bón hóa học và nâng cao tính bền vững trong sản xuất nông nghiệp hiện nay.

2. ĐẶC TÍNH CỦA PHÂN BÓN VI SINH

2.1. Hệ vi sinh vật chủ yếu trong phân bón vi sinh và công dụng

Phân vi sinh chứa các vi sinh vật sống có lợi như vi khuẩn, nấm và tảo. Qua quá trình hoạt động sống, các vi sinh vật trong phân vi sinh, thông qua tiến trình khoáng hóa, cung cấp dinh dưỡng mà cây trồng có thể hấp thụ được. Mật số vi sinh vật có lợi trong chế phẩm phân vi sinh thường đạt 10^9 - 10^{10} CFU/g và đảm bảo an toàn cao cho con người nên được sử dụng rộng rãi trong sản xuất và đời sống. Các chế phẩm vi sinh phổ biến trong nông nghiệp được sử dụng làm phân bón như chế phẩm vi khuẩn cố định N_2 , chế phẩm vi sinh vật phân giải hoặc hòa tan P, chế phẩm vi sinh vật phân giải cellulose (tạo mùn), vi sinh vật tạo kháng sinh và các chất điều hòa sinh trưởng (Bảng 1).

Bảng 1. Một số vi khuẩn thông dụng trong phân bón vi sinh

Các chi vi sinh vật có lợi	Chức năng chính
Vi khuẩn nitrate hóa, <i>Azotobacter chroococcum</i> , <i>Azospirillum brasilense</i>	Nhóm vi khuẩn chuyển hóa nitrogen mà cây không sử dụng được thành amonium hoặc nitrate để cây hấp thu (Wei et al., 2024).
Vi khuẩn cố định N ₂ cộng sinh <i>Rhizobium</i>	Cộng sinh trong rễ cây họ đậu, giúp chuyển hóa N ₂ trong không khí thành dạng N mà cây có thể sử dụng, giảm sự phụ thuộc vào phân bón tổng hợp, cải thiện cấu trúc đất và vi sinh vật đất (Huang, 2024).
<i>Bacillus</i> sp.: <i>Bacillus cereus</i> , <i>Bacillus megaterium</i> , <i>Bacillus mucilaginosus</i>	Chuyển hoá P không hòa tan thành P dễ tiêu giúp cây trồng dễ dàng hấp thu (Wei et al., 2024).
Vi khuẩn quang hợp: <i>Rhodospseudomonas capsulate</i> , <i>Rhodospseudomonas</i> sp. <i>Pseudomonas</i> sp. <i>Chromobacterium: Alcaligenes</i> sp. <i>Serratia</i> sp.: <i>Serratia marcescens</i> <i>Thiobacillus: Acidithiobacillus thiooxidans</i> , <i>Thiobacillus thioparus</i>	Sản xuất indole-3-acetic acid (IAA), siderophores và aminocyclopropane-1-carboxylic acid (ACC) thúc đẩy sinh trưởng thực vật. Đồng thời ngăn chặn sự phát triển của các tác nhân gây bệnh như vi khuẩn (<i>Pseudomonas syringae</i> , <i>Pectobacterium carotovorum</i> và <i>Ralstonia solanacearum</i>), nấm (<i>Fusarium oxysporum</i> , <i>Botrytis cinerea</i> và <i>Rhizoctonia solani</i>) và các sinh vật gây bệnh thực vật khác (Kulkova et al., 2023).
Vi khuẩn vùng rễ: <i>Pseudomonas</i> , <i>Acinetobacter</i> , <i>Streptomyces</i> , <i>Serratia</i> , <i>Arthrobacter</i> và <i>Rhodococcus</i>	Sản xuất phytohormone (cytokinins, ethylene, abscisic acid, gibberellins, và auxin) cải thiện sinh trưởng của cây trồng. Đồng thời tăng cường hấp thu chất dinh dưỡng N, P, K trong cây (Sun et al., 2024).
<i>B. edaphicus</i> , <i>B. mucilaginosus</i>	Nhóm vi sinh vật giúp tăng hàm lượng K khả dụng trong đất thông qua quá trình hòa tan và khoáng hóa (Wei et al., 2024).
<i>Streptomyces jingyangensis</i> , <i>S. pactum</i>	Sản xuất chất kháng khuẩn, ức chế sự phát triển của vi sinh vật có hại, phân hủy chất hữu cơ, giảm mật độ khối đất, cải thiện tính chất vật lý của đất (Wei et al., 2024).
Vi khuẩn acid lactic: <i>Lactobacillus</i>	Cải thiện khả năng hấp thu dinh dưỡng từ phân hữu cơ của cây trồng. Bảo vệ cây khỏi nhiều loại nấm và vi khuẩn gây bệnh bằng cách sản xuất các hợp chất kháng khuẩn, cạnh tranh với vi sinh vật gây hại tại những mô thực vật dễ bị tổn thương, hoặc tác động đến hệ miễn dịch của cây. Ngoài ra <i>Lactobacillus</i> còn sản xuất IAA thúc đẩy sinh trưởng thực vật hoặc nảy mầm hạt (Lamont et al., 2017).

2.2. Cơ chế hoạt động của hệ vi khuẩn trong phân bón vi sinh

2.2.1. Cung cấp dưỡng chất cho cây trồng

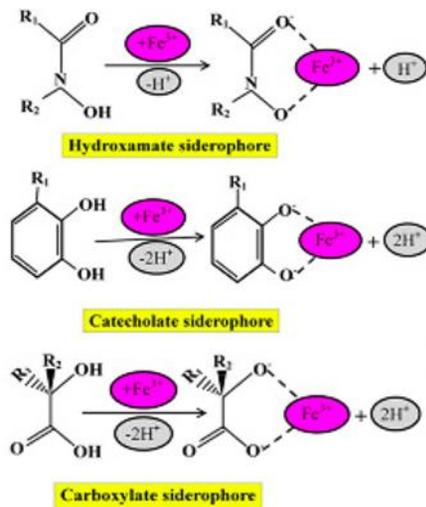
Nitơ là một nguyên tố thiết yếu cho các hoạt động sống của thực vật nhưng cây trồng không thể sử dụng trực tiếp N₂ trong khí quyển. Do đó phân bón vi sinh chứa các vi khuẩn mang gen sản xuất nitrogenases để cố định N₂ thành dạng ammonium giúp cây trồng có thể hấp thu (Xu & Wang, 2023). Ví dụ, *Rhizobia* ở rễ cây họ đậu tạo nốt sần để đáp

ứng với flavonoid (hợp chất có vai trò thu hút vi khuẩn) do thực vật chủ tiết ra, gây hiện tượng xoắn lông hút và kích hoạt sự phân chia tế bào vỏ cho quá trình sinh nốt sần. Sự tương tác giữa vi khuẩn và lông hút làm cho thành tế bào biến đổi và thoái hóa, cho phép vi khuẩn cộng sinh xâm nhập vào lông hút cây họ đậu thông qua các con đường liên bào hoặc nội bào. Vi khuẩn vùng rễ phát triển mạnh trong các sợi nhiễm trùng và phân hóa thành vi khuẩn có khả năng khử N₂ trong các nốt sần (Wei et al., 2024; Zhang et al., 2024b).

P là một dưỡng chất thiết yếu tham gia vào quá trình trao đổi chất và tăng trưởng của sinh vật. Trong đất, P tồn tại ở dạng vô cơ và hữu cơ. Dạng P vô cơ hòa tan dễ bị cố định vào các khoáng sét, cũng như các ion sắt và nhôm (ở pH < 5,5) hoặc tạo cấu trúc tinh thể với ion canxi (Ca²⁺) và magiê (Mg²⁺) ở pH > 6, khiến cây trồng khó tiếp cận và hấp thu. Các nhóm vi sinh vật có khả năng hòa tan P đóng vai trò quan trọng trong việc phân giải cả dạng hữu cơ và vô cơ thông qua quá trình khoáng hóa và hòa tan, từ đó làm tăng khả năng sử dụng P của thực vật và được tuyển chọn ứng dụng trong sản xuất phân bón vi sinh. Nhiều loài vi khuẩn như *Bacillus*, *Escherichia* và *Pseudomonas* có thể giải phóng P từ các hợp chất vô cơ chứa P không tan bằng cách tiết ra các loại acid hữu cơ (acid citric, succinic, fumaric, malic, oxalic) cạnh tranh vị trí hấp phụ với phosphate hoặc liên kết cation kim loại (Ca²⁺, Fe³⁺, Al³⁺) thông qua nhóm hydroxyl và carboxyl nên các ion này bị kéo ra khỏi muối phosphate không tan, từ đó P được giải phóng dưới dạng HPO₄²⁻ (Etesami et al., 2021). Ngoài ra, trong quá trình chuyển hóa carbon từ nguồn acid hữu cơ của vi khuẩn thì ion H⁺ được giải phóng và quá trình chuyển hoá các ion HCO₃⁻, NH₄⁺ cũng phóng thích H⁺ làm giảm độ pH của đất quanh vùng rễ, từ đó thúc đẩy quá trình hòa tan P. Vi khuẩn còn phân giải P khó tan bằng cách tổng hợp các phytase ngoại bào (xúc tác giải phóng N từ phytate trong đất), phức hợp C-P lyase (biên đổi phosphonate thành phosphate) và enzyme phosphatases (thủy phân các este acid phosphoric và anhydrit) (Bhardwaj et al., 2024). Một số dòng vi sinh vật tạo ra siderophores trong môi trường thiếu sắt. Siderophores là một loại protein có trọng lượng phân tử thấp (khoảng 400 - 1.500 Da), có khả năng liên kết rất mạnh với sắt ở trạng thái oxi hóa (Fe³⁺) nên hấp thụ sắt trong phức hợp Fe-P và giải phóng P dạng hòa tan (Cui et al., 2022). Siderophores do vi khuẩn sản sinh chủ yếu là catecholate, carboxylate và hydroxamate, tất cả đều có hai phân tử oxy - nơi tạo phối tử với Fe³⁺ (Hình 1) (Singh et al., 2022a). Trong môi trường thiếu sắt, sắt thường tồn tại dưới dạng ít hòa tan, dẫn đến nguồn sắt hữu dụng bị hạn chế đối với vi khuẩn và thực vật. Để thích nghi với sự khan hiếm này, các vi khuẩn thúc đẩy sinh trưởng thực vật, điển hình như các loài *Pseudomonas* tổng hợp siderophores hỗ trợ trực tiếp cho sự sinh trưởng của cây trồng bằng cách cung cấp sắt gián tiếp hoặc trực tiếp cho thực vật. Những chế phẩm vi khuẩn có khả năng sản sinh siderophores đã được áp dụng thành công trên nhiều loại cây trồng và cho thấy hiệu quả tích cực trong thúc đẩy tăng trưởng. Ví dụ, đậu xanh được xử lý bằng *Pseudomonas* GRP3 trong điều kiện thiếu sắt đã giúp tăng cường sinh trưởng

và cải thiện hàm lượng diệp lục tố của cây. Trong một nghiên cứu khác, khi chủng *Pseudomonas fluorescens* cho cây *Arabidopsis thaliana*, vi khuẩn đã tổng hợp nên phức chất Fe-pyoverdin, giúp tăng khả năng hấp thụ sắt của cây và cải thiện sự phát triển toàn diện của cây trồng (Hassen et al., 2016).

Nhiều dòng vi khuẩn hòa tan P từ ruộng lúa, bao gồm *Paenibacillus*, *Pseudomonas* và *Enterobacter*, đã được chứng minh khả năng hòa tan khoáng chất phosphate (tricalcium phosphate) (Habibi et al., 2019). Không chỉ giới hạn ở các con đường hòa tan, một phần P còn được vi sinh vật hấp thu và tích trữ trong suốt vòng đời của chúng. Khi vi sinh vật chết đi, lượng P này được giải phóng trở lại đất, góp phần tăng lượng P hữu dụng cho cây trồng. Thêm vào đó, một số vi khuẩn hòa tan P còn có khả năng tiết ra các hợp chất hữu cơ tạo phức với kim loại, từ đó phá vỡ liên kết giữa P và các ion kim loại, giúp giải phóng ion phosphate ra môi trường đất (Wei et al., 2024).



Hình 1. Công thức hoá học của siderophores và vị trí liên kết với Fe³⁺

(Nguồn: Singh et al. (2022a))

K có vai trò điều hòa hoạt động của các enzyme trong cây, tăng khả năng chống chịu với môi trường mặn, hỗ trợ quá trình quang hợp cũng như nhiều chức năng sinh học khác. Thiếu K trong đất có thể cản trở các quá trình này của cây, giảm sự phát triển của cây và ảnh hưởng bất lợi đến chất lượng của trái. Phân vi sinh chứa các vi khuẩn phân giải K như *Bacillus circulans*, *Paenibacillus mucilaginosus* và *Bacillus edaphicus* có khả năng phân hủy chất hữu cơ và tàn dư cây trồng, giải phóng K cho đất và cây trồng; đồng thời giải phóng chậm K vào đất bằng

acid hữu cơ và vô cơ được tạo ra trong quá trình hoạt động trao đổi chất của vi khuẩn. Các acid này cung cấp H⁺ để tách K khỏi khoáng chất trên bề mặt keo đất theo cơ chế trao đổi ion, đồng thời gây giảm pH đất tạo thuận lợi cho quá trình trao đổi K⁺ (Bhardwaj et al., 2024). Tương tự cơ chế phân giải P, các acid hữu cơ và siderophores được tạo ra bởi vi khuẩn có thể giải phóng K⁺ từ các khoáng chất bằng cách tạo phức với các ion Si⁴⁺, Al³⁺, Fe²⁺ và Ca²⁺ (các hợp chất kim loại-hữu cơ) giúp giải phóng K từ khoáng feldspar (KAlSi₃O₈), mica (K₁₂[(AlO₂)₁₂(SiO₂)₁₂·nH₂O), muscovite (KAl₃Si₃O₁₀(OH)₂) vào dung dịch đất. Một số vi sinh vật tạo ra màng sinh học chứa exopolysaccharides (EPS) giúp giữ ẩm và ổn định keo đất, duy trì môi trường trao đổi K⁺ linh hoạt (Etesami et al., 2017). Ví dụ, dòng vi khuẩn *P. mucilaginosus* sản xuất ra các chất chuyển hóa chứa hormone thực vật và acid hữu cơ, tăng cường sự phân giải và hấp thu K, do đó tăng cường sự phát triển ở cây táo con (Chen et al., 2020).

2.2.2. Sản xuất chất kích thích tăng trưởng thực vật và chống stress cho cây trồng

Vi sinh vật ở vùng rễ giữ vai trò thiết yếu trong điều tiết và tạo ra các hormone sinh trưởng thực vật, góp phần quan trọng vào quá trình sinh trưởng và phát triển của cây trồng. Năm nhóm hormone thực vật quan trọng như auxin, gibberellin, cytokinin, ethylene và acid abscisic – đều được thực vật tổng hợp nội sinh và có ảnh hưởng tích cực đến nhiều quá trình sinh lý khác nhau. Trong đó, IAA thuộc nhóm auxin và là một acid carboxylic, chủ yếu hình thành từ tryptophan, thúc đẩy sự phát triển thông qua việc tăng cường quá trình phân chia tế bào, kéo dài và biệt hóa mô, từ đó tác động đến hình thành của mạch gỗ và hệ thống rễ, ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng hấp thu dinh dưỡng và phát triển tổng thể của cây trồng. Đặc biệt, IAA được tổng hợp bởi vi khuẩn giúp tăng chiều dài rễ, giúp cây trồng hấp thu dinh dưỡng hiệu quả hơn. Nhiều dòng vi khuẩn như *Azotobacter* spp., *Rhizobium* spp., *Pantoea agglomerans*, và *Rhodospirillum rubrum* đã được xác định có khả năng tiết cytokinin – loại hormone có vai trò kích thích phân chia tế bào và góp phần biệt hóa, phát triển của các mô thực vật. Tương tự, gibberellin – một loại hợp chất diterpenoid, được biết đến với tác dụng kích thích kéo dài của thân, tạo điều kiện thuận lợi cho cây trồng tăng trưởng (dos Santos et al., 2020).

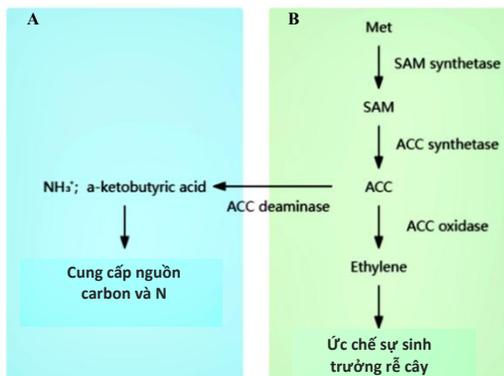
Kết quả nghiên cứu của Bonartsev et al. (2016, as cited in Wei et al., 2024) cho thấy *Azotobacter chroococcum* có thể điều tiết quá trình phát triển của

cây bằng cách sản sinh cytokinin. Bên cạnh đó, các dòng *B. subtilis*, *B. cereus* và *B. megaterium* có khả năng kích thích sự phát triển rễ và hệ rễ của cây kiwi nhờ vào khả năng tổng hợp IAA. Những thử nghiệm khác cũng ghi nhận rằng *B. subtilis* RC03, *B. simplex* RC19 và *Comamonas testosteroni* RC41 giúp tăng đáng kể tỷ lệ ra rễ của cành giâm kiwi thông qua tăng sản lượng IAA.

Ethylene, một hormone khí có vai trò đa dạng trong sinh lý thực vật, không những điều chỉnh các quá trình như hình thành lông hút, nảy mầm, chín quả, rụng lá mà còn giúp cây ứng phó với các loại căng thẳng sinh học (tác nhân gây bệnh) và phi sinh học (nhiệt độ cao/thấp, hạn, mặn, ngập úng). Tuy nhiên, ethylene cũng có thể gây ức chế quá trình kéo dài rễ trong một số trường hợp (Glick, 2012). Khi đối mặt với các điều kiện bất lợi, thực vật thường tăng cường sản xuất 1-Aminocyclopropane-1-carboxylate (ACC), dẫn đến sự tích tụ ethylene với nồng độ cao, ức chế sự phát triển của cây. Enzyme ACC deaminase đóng vai trò xúc tác phân giải ACC thành butyrate và ion amoni. Quá trình này giúp giảm hàm lượng ethylene tích tụ trong điều kiện stress, từ đó hạn chế tác động tiêu cực của hormone này lên quá trình sinh trưởng của cây (Singh et al., 2022b). Tại vùng rễ, con đường chuyển hóa methionine và ACC phản ánh rõ vai trò của ethylene đối với sinh lý rễ. Methionine được chuyển hóa thành S-adenosylmethionine (SAM) nhờ enzyme SAM synthetase, sau đó ACC synthase xúc tiến việc chuyển SAM thành ACC. ACC tiếp tục được chuyển hóa thành ethylene thông qua hoạt động của enzyme ACC oxidase. Tuy nhiên, ethylene được sản xuất quá mức trong giai đoạn này có thể cản trở sự phát triển bình thường của rễ. Sự hiện diện của ACC deaminase trong môi trường rễ giúp chuyển ACC thành ion amoni và acid α -butyric. Ngoài sự giảm nồng độ ACC – yếu tố trung gian tạo ethylene, quá trình này còn cung cấp nguồn carbon và N cần thiết cho vi sinh vật, đồng thời hỗ trợ cây trồng duy trì sự phát triển rễ khỏe mạnh và kéo dài rễ trong điều kiện căng thẳng (Wei et al., 2024) (Hình 2).

Theo Sarkar et al. (2018), dòng vi khuẩn *Enterobacter* sp. P23 có khả năng chịu mặn và sở hữu ACC deaminase, góp phần tăng sức chống chịu cho cây trong điều kiện bất lợi. Tương tự, việc bổ sung các vi khuẩn rễ sản xuất ACC-deaminase *P. aeruginosa*, *Enterobacter cloacae*, *Achromobacter xylosoxidans* và *Leclercia adecarboxylata* đã giúp cải thiện đáng kể năng suất ngô trong điều kiện khô hạn (Farooq et al., 2020). Hơn nữa, cây ngô được xử lý bằng các vi khuẩn này cũng tăng tốc độ quang hợp, độ dẫn khí khổng, cũng như hàm lượng diệp

lục A, tổng diệp lục và carotenoid – những yếu tố quan trọng cho quá trình sinh trưởng và trao đổi chất hiệu quả trong thực vật (Danish et al., 2020). Các hormone thực vật này được tổng hợp và điều hòa bởi vi sinh vật vùng rễ cho thấy một mối quan hệ cộng sinh phức tạp nhưng thiết yếu giữa cây và hệ vi sinh vật đất, đóng vai trò trung tâm trong bảo vệ sức khỏe và nâng cao năng suất cây trồng.



Hình 2. Quá trình tổng hợp và phân hủy ACC

A: tác động của vi khuẩn có enzyme ACC deaminase,
 B: con đường sinh tổng hợp ethylene trong cây.

(Nguồn: Wei et al. (2024))

Ngoài việc giúp cây tiếp cận tốt hơn với dinh dưỡng, các vi sinh vật còn có khả năng ngăn ngừa sự tích lũy các hợp chất độc hại. Chẳng hạn như hàm lượng cadimi trong rễ và lá lúa giảm nhờ bổ sung vi khuẩn *Bacillus cereus* (Jan et al., 2019), giảm sự hấp thu crom ở rễ và các bộ phận khác của cây lúa khi chủng *Bacillus licheniformis* (Jamil et al., 2014), giảm độc tính của kim loại nặng trong đất bằng cách tiết exopolysaccharides hấp phụ kim loại nặng thông qua cơ chế trao đổi ion, kết tủa bề mặt hoặc oxy hóa khử (Qin et al., 2024).

2.2.3. Cải thiện cấu trúc đất

Cấu trúc đất là một trong những chỉ số quan để đánh giá sự thoái hóa đất. Cấu trúc đất là sự sắp xếp của các hạt đất riêng lẻ bằng cách liên kết các hạt này với nhau để tạo thành các hạt vi mô (<250 μm) và các hạt lớn (>250 μm). Các hạt đất rất quan trọng trong lưu trữ carbon và chống xói mòn đất, hỗ trợ sự phát triển của rễ, các chức năng của đất. Quá trình hình thành các hạt đất cần sự tham gia của các yếu tố gắn kết như mùn, polysaccharides, dịch tiết của vi sinh vật và các lực kết tụ. Trong đó, mùn là tác nhân ổn định chính, có nguồn gốc từ quá trình chuyển đổi chất hữu cơ của vi sinh vật. Các lực kết tụ sinh học chủ yếu từ hoạt động của vi sinh vật và sự phát triển của rễ (Tan et al., 2025). Các sản phẩm

khoáng hữu cơ liên kết với các hạt đất để tạo thành các tập hợp vi mô ổn định (đường kính 2 - 20 μm). Các tập hợp vi mô nhỏ này lần lượt bị liên kết bởi các sản phẩm của vi khuẩn và nấm hoại sinh để tạo thành các tập hợp lớn hơn (đường kính 20 - 250 μm). Hơn nữa, trong quá trình phát triển của vi khuẩn, các chất polyme ngoại bào - exopolysaccharides (EPS) được tạo ra trong dung dịch đất. EPS tích điện âm nên có đặc tính kết dính, tạo liên kết giữa các hạt đất sét để hình thành các tập hợp đất. Các tập hợp đất này kết dính với nhau để tạo thành các tập hợp lớn (đường kính >250 μm) và do đó làm tăng sự kết dính giữa các hạt giúp ổn định cấu trúc đất (Rashid et al., 2016).

Tóm lại, các hoạt động sống của vi khuẩn trong phân bón vi sinh đã cung cấp các nguyên tố N, P, K và chất kích thích tăng trưởng cho cây trồng, thúc đẩy cây sinh trưởng trong điều kiện giảm phân bón hoá học hoặc bất lợi; đồng thời cải thiện cấu trúc đất.

3. CÔNG NGHỆ SẢN XUẤT PHÂN BÓN VI SINH

3.1. Quy trình sản xuất phân vi sinh

Công nghệ sản xuất phân hữu cơ vi sinh bao gồm hai giai đoạn chính: (i) tuyển chọn và sàng lọc dòng vi sinh vật có lợi; (ii) sản xuất chế phẩm ở dạng lỏng, rắn hoặc dạng bột khô/đông khô tùy theo mục đích sử dụng. Quy trình sản xuất phân bón vi sinh bao gồm việc tuyển chọn nguồn vi khuẩn tiềm năng, nhân sinh khối và tạo chế phẩm (Fasusi et al., 2021).

Các dòng vi khuẩn được tuyển chọn qua các bước: i) thu và xử lý mẫu sinh vật bao gồm: mẫu đất/ rễ cây, nước, phụ phế phẩm; ii) phân lập và làm thuần/tách ròng; iii) xác định hoạt tính/định lượng hoạt tính; iv) đánh giá ảnh hưởng đối với cây trồng; v) xác định điều kiện sinh trưởng, phát triển và bảo quản; vi) định danh; vii) lưu giữ nguồn (Fasusi et al., 2021).

Việc sản xuất phân vi sinh hay chế phẩm vi sinh bắt đầu từ quá trình nhân sinh khối vi khuẩn bằng hệ thống lên men dung tích lớn với điều kiện dinh dưỡng (nguồn carbon, nitrogen), oxy (tốc độ sục khí), pH, nhiệt độ thích hợp nhằm đạt mật độ tế bào cao nhất và duy trì tính ổn định của dòng vi sinh. Ví dụ, kết quả nghiên cứu của Tran et al. (2017) cho thấy sự tối ưu hoá sản xuất chế phẩm vi sinh dạng rắn từ 3 dòng vi khuẩn *Bacillus subtilis* SHV 06 có hoạt tính phân giải hợp chất P khó tan, *Pseudomonas chlororaphis* SHV 2.2 đối kháng VSV gây bệnh vùng rễ cây trồng cạn và *Azotobacter beijerinckii* SHV 19 cố định N₂, với chất mang là biochar có

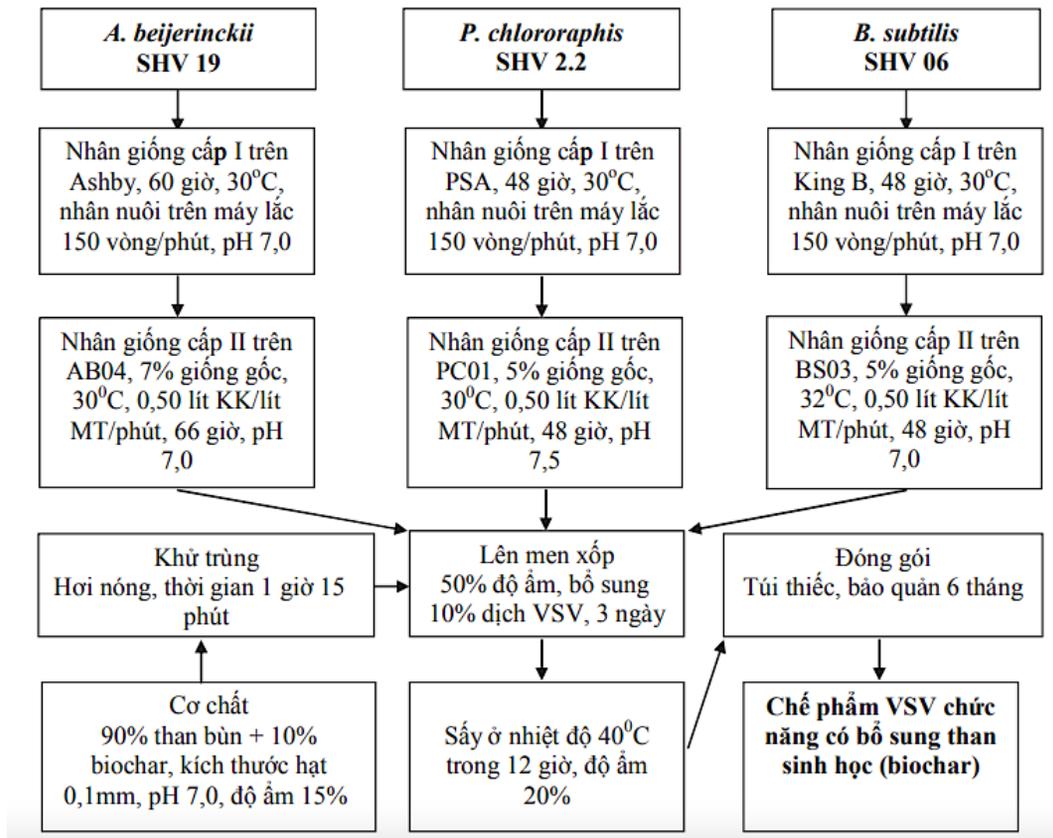
nguồn gốc từ vỏ cà phê, than bùn, vôi bột được tiến hành như sau:

i) Nhân giống vi sinh vật: Việc nuôi cấy cấp I vi sinh vật được tiến hành trong môi trường cơ bản (King B, SPA, Ashby tương ứng với các dòng SHV 06, SHV 2.2 và SHV 19 bổ sung ri đường, bột thủy phân nấm men, nước chiết đậu) và điều kiện tối ưu pH = 7,0; nhiệt độ 28 - 30°C (1) và lắc 150 vòng/phút. Sau 24 - 48 giờ nuôi cấy, vi khuẩn được cấy truyền sang nuôi sinh khối cấp II trong thiết bị lên men 15 lít với môi trường tương tự (1) ở pH 7,0 - 7,5, nhiệt độ 30 - 32°C, với các tỷ lệ tiếp giống thay

đổi trong khoảng từ 5 đến 7%, cung cấp 0,5 lít không khí/lít môi trường/phút. Mật số vi sinh vật đạt cực đại ở 48 giờ đối với *B. subtilis* SHV 06, *P. chlororaphis* SHV 2.2 và 66 giờ với *A. beijerinckii* SHV 19.

ii) Lên men với chất mang: Chất mang gồm than bùn và biochar theo tỷ lệ 9:1 được khử trùng, sau đó được trộn với vi sinh theo tỷ lệ 90% chất mang và 10% vi sinh, ủ trong 3 ngày với ẩm độ 50%.

iii) Sấy và đóng gói: Phân vi sinh được sấy ở 40°C trong 12 giờ để đạt độ ẩm 20%, sau đó đóng gói trong túi thiếc, hạn sử dụng là 6 tháng (Hình 3).



Hình 3. Tóm tắt quy trình sản xuất chế phẩm vi sinh có bổ sung biochar

KK: không khí, MT: môi trường.

(Nguồn: Tran et al. (2017))

3.2. Các dạng phân vi sinh

Phân vi sinh có thể được sử dụng ở dạng lỏng, dạng rắn phối trộn với chất mang (Tran et al., 2018; Fasusi et al., 2021). Mỗi dạng chế phẩm có những ưu, nhược điểm riêng. Chế phẩm vi sinh dạng lỏng dễ nuôi cấy trên máy lắc lớn hoặc hệ thống lên men có hệ thống điều khiển tốc độ khí để tạo sinh khối

lớn. Sau đó dịch vi khuẩn được đóng vào chai lọ hoặc bình nhựa. Dạng này có thể sử dụng ngay để trộn vào hạt giống hoặc đất, tưới vào rễ; tuy nhiên chế phẩm cần được bảo quản ở điều kiện lạnh, vì vậy khá tốn kém và không thuận tiện cho vận chuyển, khả năng sống sót và độ bám dính của vi khuẩn trên hạt giống và cây trồng không cao (Nguyen et al., 2024a).

Chế phẩm dạng rắn với chất mang giúp bảo vệ vi sinh vật trong chế phẩm từ khi sản xuất đến lúc sử dụng nên thời gian bảo quản lâu hơn nhưng dễ bị ảnh hưởng bởi các yếu tố sinh học, phi sinh học trong đất (Nguyen et al., 2024a). Các chất mang có thể là than bùn, đất sét, than đá, lignin, đất khoáng, bã mía, lõi ngô nghiền, vỏ trấu, vỏ cà phê, bột polyacrylamide, phân ủ; trong đó, than bùn là chất mang phổ biến nhất. Than bùn chủ yếu có nguồn gốc từ thực vật được phân huỷ một phần nên không chỉ hỗ trợ vi khuẩn tồn tại và phát triển mà còn có tính kinh tế cao trong sản xuất phân sinh học. Việc phối trộn chất mang có hai dạng: trộn với chất mang khử trùng hoặc không khử trùng. Phân vi sinh được trộn với chất mang đã được thanh trùng (bằng phương pháp hơi nước bão hòa hoặc chiếu xạ) có chất lượng cao, thời gian bảo quản lâu và dễ đánh giá, kiểm tra chất lượng nhưng cần đầu tư nhân công có kỹ thuật, tài chính và đòi hỏi điều kiện đặc biệt cho khử trùng chất mang. Chất mang không khử trùng thì kỹ thuật phối trộn đơn giản, không cần kỹ thuật đặc biệt, có thể sử dụng các vật liệu hữu cơ địa phương sẵn có làm chất mang (Tran et al., 2018).

Ngoài ra, chế phẩm vi phân vi sinh có thể ở dạng bột khô được chế biến khá phức tạp. Đối với nhóm vi khuẩn có lợi không tạo bào tử, sau khi lên men, sinh khối vi khuẩn được sục khí để loại bỏ nước và ly tâm để tách vi khuẩn ra khỏi môi trường nuôi cấy. Sau đó vi khuẩn được hấp phụ vào chất mang như bột cao lanh, tiếp tục hấp phụ với CaSO₄ nhằm thu được chế phẩm dạng bột khô. Dạng này giúp bảo quản và vận chuyển thuận lợi, ít nguy cơ nhiễm tạp, thời gian sử dụng có thể kéo dài hơn một năm. Tuy nhiên, do vi sinh vật không có khả năng tạo bào tử, nên dễ bị tổn thương trong quá trình sấy, dẫn đến tỷ lệ sống sót thấp và chi phí sản xuất cao, làm giảm hiệu quả kinh tế. Để nâng cao khả năng bảo tồn, sinh khối có thể được đông khô ở nhiệt độ rất thấp (từ -20 đến -40°C). Dạng chế phẩm đông khô giúp vi khuẩn duy trì được hoạt tính sinh học tốt, ít bị nhiễm tạp và có khả năng lưu tồn lâu dài. Tuy nhiên, phương pháp này thường đi kèm với tỷ lệ bám dính lên hạt giống thấp, vi khuẩn khó phục hồi khi hoàn nguyên và quy trình sản xuất tốn kém, đòi hỏi thiết bị chuyên dụng (Tran et al., 2018).

Đối với nhóm vi sinh vật có lợi như *Bacillus* spp. chế biến thành các chế phẩm khô hoặc đông khô thuận lợi hơn nhờ khả năng tạo bào tử giúp vi khuẩn chịu được điều kiện khắc nghiệt như nhiệt độ cao,

khô, tia UV hay pH không thuận lợi. Quá trình chế biến cũng bao gồm các bước sục khí, ly tâm và hấp phụ lên chất mang, tuy nhiên tỷ lệ sống sót của bào tử cao hơn nhiều so với tế bào sinh dưỡng. Vi khuẩn tạo bào tử có thể được sấy khô bằng phương pháp phun sấy hoặc sấy tầng sôi, từ đó thu được sản phẩm dạng bột mịn dễ đóng gói, vận chuyển và bảo quản lâu dài. Nhờ sự ổn định và sức sống cao của bào tử, chế phẩm từ nhóm này thường có hiệu quả sinh học bền vững hơn, khả năng bám dính lên hạt giống tốt hơn và tính ứng dụng cao hơn trong sản xuất nông nghiệp quy mô lớn. Hơn nữa, chi phí sản xuất cũng hợp lý hơn so với chế phẩm từ vi khuẩn không sinh bào tử (Tran et al., 2018).

4. HIỆU QUẢ CỦA PHÂN BÓN VI SINH TRONG SẢN XUẤT NÔNG NGHIỆP

4.1. Về mặt kinh tế

Kết quả nghiên cứu và thử nghiệm phân vi sinh tại Việt Nam đã khẳng định hiệu quả tích cực của phân hữu cơ vi sinh đối với cây trồng. Cụ thể, việc sử dụng loại phân này giúp tăng năng suất cà phê, bông, tiêu, cà chua, lạc, khoai tây từ 6,79 - 36,58% tại các tỉnh miền Bắc và miền Trung, và mang lại lợi nhuận từ 743.000 - 12.310.000 đồng/ha tùy loại cây trồng (Pham, 2005). Chế phẩm vi sinh vật cố định N₂ *Bradyrhizobium japonicum* RA18, phân giải P khó tan *Bacillus megaterium* P1107, hòa tan K *Paenibacillus castaneae* S3.1 và sinh tổng hợp polysaccharit *Lipomyces starkeyi* PT5.1 với mật số $\geq 10^8$ CFU/g đã được sử dụng cho cây lạc trồng trên đất cát biển, điều này đã giúp cải thiện độ phì của đất, tăng mật độ vi sinh vật đất 10 lần, tăng độ ẩm đất 20,2 - 21,5% và năng suất lạc 16,1 - 18,2%; đồng thời lợi nhuận cũng tăng 21,3 - 28,0% (tương đương 8,10 - 11,45 triệu đồng/ha lãi thuần) (Nguyen et al., 2016).

4.2. Đối với cây trồng và đất canh tác

Việc sử dụng các dòng vi sinh vật có lợi được xem là giải pháp tiềm năng nhằm nâng cao hiệu suất canh tác và giảm phụ thuộc vào phân bón hóa học, hướng tới nền nông nghiệp bền vững trong các điều kiện khắc nghiệt như phèn, mặn, giúp cải thiện năng suất, phục hồi đất canh tác thông qua tăng chất dinh dưỡng hòa tan, pH và giảm độc chất. Trong đó, vi khuẩn đã được ứng dụng như phân bón sinh học, giúp giảm lượng phân bón hoá học và cải thiện năng suất trên nhiều loại cây trồng (Bảng 2).

Bảng 2. Hiệu quả của chế phẩm vi khuẩn về mặt sử dụng dinh dưỡng và năng suất của cây trồng

Vi khuẩn	Loại cây trồng	Phân bón hoá học	Năng suất	Hấp thu dinh dưỡng	Đặc tính đất	Tài liệu tham khảo
<i>B. cepacia</i> BL1-10, <i>Bacillus megaterium</i> ST2-9, <i>Bacillus aquimaris</i> KG6-3 và <i>Ochrobactrum ciceri</i> TCM 39 (rắn)	Hành lá trồng chậu	↓ 25% N, ↓ 25% P	↑ 13,1 - 48,6%	-	↑ mật số vi khuẩn có lợi pH và EC được duy trì ổn định	(Nguyen et al., 2022)
<i>R. palustris</i> (dạng rắn phối trộn rom rạ)	Mè trên đất phù sa	↓ 25% N và P	↑ 2,0 - 4,2 g/chậu	-	↑ pH 1,9-3,9 ↑ NH ₄ ⁺ 28,2 mg/kg ↑ P dễ tiêu 14,8 mg/kg ↑ K trao đổi 0,353 - 0,543 meq/100g	(Nguyen et al., 2023)
<i>Rhodobacter sphaeroides</i> (lông)	Dứa trên đất phèn	↓ 25% P	↑ 12,1%	↑ P 42,9%	↑ P dễ tiêu 25,3 - 33,9% ↑ K trao đổi 0,353- 0,543 meq/100g	(Tran et al., 2022)
<i>Burkholderia tropica</i> L-VT08c và <i>E. cloacae</i> N-VT01	Dứa trên đất phèn	↓ 50% N	↑ 15,4%	↑ 20,7% vitamin C	↑ NO ₃ ⁺ 38,5% ↑ NH ₄ ⁺ 17,9% ↑ P hữu dụng 40,9%	(Nguyen et al., 2024b)
<i>Bacillus velezensis</i> VK7 và <i>Ensifer sesbaniae</i> SDT2.3 (bột)	Cà chua trồng chậu	↓ 10% NPK	↑ 15,7% sinh khối thân lá	-	↑ 16,51% carbon hữu cơ ↑ 120,11% tỷ lệ hạt cát	(Nguyen et al., 2025)
<i>B. vietnamiensis</i> BV2 (lông)	Lúa	↓ 50% N	Không khác biệt	-	-	(Ngo et al., 2024)
<i>Gluconacetobacter diazotrophicus</i> (lông)	Lúa trồng chậu trên đất phù sa	↓ 25-50% N	Không khác biệt	-	-	(Vu et al., 2024)
<i>R. palustris</i> VNW64, VNS89, TLS06 và VNW02 (lông)	Dưa lưới	↓ 25% P	↑ 5,26 - 9,42%	↑ P 1,04 - 2,01 kg/ha	↑ pH 0,30 - 0,71 ↑ P dễ tiêu 18,9 - 41,9 mg/kg	(Ly et al., 2024)

Trên đất phù sa, phân bón vi sinh chứa vi khuẩn *Azospirillum lipoferum* và *Burkholderia vietnamiensis* (cố định N₂), *Pseudomonas stutzeri* (hòa tan P) và *B. subtilis* (phân giải K) đã góp phần tiết kiệm từ 25% phân bón hóa học cho đậu bắp và ớt sừng vàng, đến 50% phân bón hóa học cho cà sọc lem, mà năng suất tương đương với nghiệm thức bón 100% phân hóa học. Đồng thời phẩm chất nông sản từ các nghiệm thức sử dụng phân bón vi sinh được cải thiện thông qua giảm hàm lượng nitrate trong trái so với nghiệm thức bón 100% phân hóa học (Nguyen & Cao, 2012). Wang et al. (2021) đã đánh giá hiệu quả của ba phương pháp bổ sung vi khuẩn kéo dài 5 năm: vi khuẩn hòa tan P *Burkholderia cepacia* ISOP5, *R. palustris* ISP-1 và tổ hợp hai dòng cho lạc đã được bổ sung. Năng suất

lạc tăng tương ứng 8,1%, 12,5% và 19,5% với ba phương pháp trên. Đồng thời điều này giúp cải thiện hấp thu N, tăng hàm lượng protein trong hạt, cải thiện chất lượng đất và một số thay đổi nhỏ trong cộng đồng vi sinh vật đất. Việc bổ sung vi khuẩn đã giảm tỷ lệ hiện diện của các gen liên quan đến cơ chế hấp thu và vận chuyển P trong hệ vi sinh vật đất. Ngược lại, số lượng các gen liên quan đến quá trình chuyển đổi P không tan (vô cơ) thành dạng dễ hấp thu và khoáng hóa P hữu cơ lại tăng lên, phản ánh sự điều chỉnh chức năng của hệ vi sinh vật theo hướng cải thiện khả năng cung cấp P cho cây trồng (Wang et al., 2021). Ngoài ra, số lượng tương đối của các gen liên quan đến chuyển hóa N cũng được tăng cường đáng kể. Do đó, việc ứng dụng các dòng vi khuẩn *B. cepacia* ISOP5 và *R. palustris* ISP-1

không chỉ nâng cao năng suất cây trồng mà còn cải thiện chất lượng đất, thúc đẩy hoạt động sinh học của hệ vi sinh vật đất, từ đó mở ra hướng tiếp cận hiệu quả cho mô hình nông nghiệp sinh thái và phát triển bền vững.

Các vi khuẩn chịu hạn sản xuất ACC deaminase *Rhodococcus kroppenstedtii* IPTS 7 và *Bacillus altitudinis* CWN 5 đã tăng hấp thu N và P tương ứng 35,10 - 42,61 mg/g và 2,67 - 3,68 mg/g, tăng chiều dài rễ và chiều cao thân đậu đen đến 174,24% và 194,86% khi trồng chậu trên đất thịt pha cát trong điều kiện stress hạn hán. Hơn nữa, hoạt động hô hấp của đất được tăng cường và ACC deaminase trong đất cũng tăng từ 2,03 đến 5,51 $\mu\text{mol/mL}$ (ước tính theo phương pháp của Honma and Shimomura (1978, as cited in Chandwani & Amaresan, 2024), đo bằng phương pháp quang phổ ở bước sóng 540 nm, sử dụng α -ketobutyrate làm chuẩn). Do đó, các dòng vi khuẩn này đã giảm stress hạn hán cho cây trồng (cây đậu đen trong giai đoạn này mầm đến 30 ngày tuổi) và tăng cường hấp thu dưỡng chất cũng như cải thiện sức khỏe đất (Chandwani & Amaresan, 2024).

Kết quả phân tích tổng hợp của Pei et al. (2025) đã cho thấy phân bón sinh học chứa vi khuẩn, nấm, xạ khuẩn hoặc các sinh vật phức hợp đã giúp tăng sinh trưởng và năng suất cây trồng. Phân bón sinh học đã thúc đẩy cây trồng sinh trưởng và phát triển thể hiện qua các chỉ tiêu hình thái như chiều cao, chiều dài thân, số lá, kích thước lá, từ đó tăng 25,42% sinh khối của cây trồng. Đặc biệt hệ rễ cây trồng mở rộng về chiều dài, diện tích bề mặt, thể tích 19,23 - 38,03% và sinh khối rễ tăng 26,06%. Ngoài ra, phân bón sinh học cải thiện năng suất ở nhiều nhóm cây trồng (ngũ cốc, cây ăn quả, cây lấy củ) thông qua tăng số hạt, số quả, trọng lượng quả và đồng đều kích thước củ. Trong số 23 loại cây trồng được tổng hợp phân tích, phân bón sinh học đã cải thiện năng suất của 21 loại, chẳng hạn như cây kê cải thảo, gừng, các loại đậu với năng suất tăng lần lượt là 65,42%, 35,57, 39,18 và 54,03%. Chất lượng nông sản cũng được cải thiện đáng kể, hàm lượng vitamin C, protein, carotenoid tăng 14,61, 16,61 và 15,18% tương ứng; đồng thời hàm lượng nitrate giảm 21,94%. Đồng thời, phân bón từ vi sinh vật cũng giúp tăng hoạt động enzyme nitrogenase và sức sống của rễ, góp phần nâng cao khả năng chống chịu bệnh, mức độ bệnh và tỷ lệ mắc bệnh giảm lần lượt 54,45% và 42,52%. Bên cạnh đó, sức khỏe đất cũng được cải thiện khi sử dụng phân bón sinh học. Điều này được thể hiện qua tăng hàm lượng chất hữu cơ trong đất (16,64%), tăng hoạt động của enzym như urease (57,60%), phosphatase (43,51%),

sucrase (22,12%), catalase (24,97%), kích thích quần thể vi sinh vật có lợi phát triển trong khi ức chế các sinh vật gây bệnh. Hiệu quả của phân bón sinh học được tối đa hóa khi sử dụng kết hợp với các chất cải tạo đất hữu cơ, dẫn đến năng suất tăng 29,20%, đặc biệt là bón trước khi trồng.

Các kết quả nghiên cứu trên đã minh chứng việc ứng dụng phân bón vi sinh có thể nâng cao hiệu quả sử dụng phân bón hóa học, nhờ cải thiện khả năng hấp thu dinh dưỡng và kích thích sinh trưởng của cây trồng. Thực tế cho thấy, khi phân vi sinh được kết hợp với phân hóa học, lượng phân bón hóa học có thể giảm đáng kể (25 - 50%) mà năng suất cây trồng vẫn được duy trì hoặc tăng lên. Đồng thời, các đặc tính lý hoá học của đất cũng được cải thiện theo hướng tăng pH và hàm lượng dinh dưỡng (cả vô cơ và hữu cơ), góp phần hướng tới canh nông nghiệp bền vững và thân thiện với môi trường.

4.3. Đối với môi trường

Việc ứng dụng vi khuẩn còn góp phần giảm phát thải khí nhà kính. Một số vi khuẩn cố định N_2 cộng sinh có thể giảm thiểu khí N_2O bốc thoát từ vùng rễ cây họ đậu nhờ vào enzyme khử N_2O . Vi khuẩn oxy hóa methane nội sinh (methanotrophs) trong rễ lúa giảm phát thải methane bằng cách sử dụng methane như nguồn carbon để cố định N_2 . Hara et al. (2022, as cited in Minamisawa, 2022) sử dụng chất ức chế methane monooxygenase nhằm hạn chế hoạt động oxy hoá methane của methanotrophs loại II đã cho thấy 65% tổng lượng N cố định bởi rễ lúa có nguồn gốc từ quá trình hoạt động của methanotrophs, do đó methanotrophs được ứng dụng trên ruộng lúa vừa giúp giảm phân N hoá học, vừa giảm phát thải khí nhà kính. Áp dụng *Methylobacterium oryzae* MNL7 đã giảm 19,9% lượng khí thải methane tích lũy, dẫn đến giảm 15,2% tiềm năng nóng lên toàn cầu theo năng suất lúa (Malyan et al., 2021). Việc tưới vi khuẩn *Methylococcus capsulatus* liều 15 L/ha cho lúa đã giảm phát thải khí nhà kính methane và N_2O tương ứng 31 - 60% và 34 - 50%. Ngoài ra, vi khuẩn còn giúp giảm phân N nhưng tăng tốc độ quang hợp, độ dẫn khí khổng, tốc độ thoát nước lên 18, 22, 48% tương ứng và tăng 15 - 27% năng suất hạt ở các mùa và vùng sinh thái khác nhau (Kumar et al., 2024).

Tóm lại, phân bón vi sinh không chỉ giúp giảm lượng phân bón hoá học, tăng sinh trưởng, khả năng chống chịu của cây trồng, tăng năng suất và chất lượng nông sản mà còn tăng cường sức khỏe đất thông qua tái cấu trúc hệ vi sinh vật theo hướng có lợi và tăng độ phì nhiêu cho đất, qua đó giúp tăng hiệu quả sử dụng phân bón hoá học, tạo ra vi môi trường thuận lợi cho sự sinh trưởng và năng suất cây

trồng bền vững; đồng thời giảm phát thải khí nhà kính góp phần bảo vệ môi trường sống.

5. THÁCH THỨC SỬ DỤNG PHÂN BÓN VI SINH VÀ GIẢI PHÁP THỨC ĐẨY

Phân bón vi sinh từ vi khuẩn đang được xem là một giải pháp thay thế một phần cho phân bón hóa học, góp phần giảm thiểu tác động bất lợi đến môi trường và thúc đẩy canh tác nông nghiệp thân thiện với hệ sinh thái. Các dòng vi khuẩn hữu ích trong phân bón vi sinh có khả năng cố định N_2 , hòa tan P và K khó tan, sản sinh các chất kích thích sinh trưởng thực vật và tăng cường khả năng chống chịu của cây trồng với điều kiện bất lợi. Mặc dù được khẳng định về mặt khoa học, tuy nhiên việc ứng dụng phân bón vi sinh trong thực tiễn vẫn còn nhiều hạn chế do các rào cản kỹ thuật, kinh tế và nhận thức xã hội.

i) Nhiều dòng vi khuẩn được phân lập và xác định tiềm năng ứng dụng như phân bón vi sinh hàng năm nhưng số lượng dòng vi khuẩn được chuyển sang giai đoạn bào chế thành sản phẩm vi sinh thương mại rất hạn chế (Díaz-Rodríguez et al., 2025). Hơn nữa các chế phẩm phân bón vi khuẩn lỏng và phân vi sinh sử dụng chất mang khử trùng chủ yếu được áp dụng trong phạm vi các đề tài nghiên cứu khoa học hoặc một số dự án sản xuất thử nghiệm mà chưa sử dụng trên diện rộng (SFI, 2021).

ii) Nông dân chưa có thói quen sử dụng phân vi sinh do tập quán sử dụng phân hóa học vì tác động nhanh, dễ nhận thấy; trong khi phân vi sinh lại có tác động chậm và gián tiếp, vì thế nông dân khó nhận ra lợi ích rõ ràng trong ngắn hạn (Fasusi et al., 2021). Ngoài ra, khả năng lưu trữ và bảo quản kém nên việc áp dụng vẫn chỉ mang tính cục bộ (Nguyen et al., 2024a).

iii) Tính ổn định và hiệu quả của phân vi sinh trong điều kiện tự nhiên kém ổn định. Hiệu quả của vi sinh vật trong phân bón vi sinh phụ thuộc vào nhiều yếu tố môi trường như pH, nhiệt độ, độ ẩm, và điều kiện đất cụ thể. Ngoài ra, phần lớn vi khuẩn trong phân vi sinh có tính chọn lọc và chuyên biệt, dễ bị suy giảm hoạt tính hoặc không phát huy tác dụng trong môi trường đất không phù hợp hoặc điều kiện môi trường khắc nghiệt (Fasusi et al., 2021).

iv) Sản phẩm phân vi sinh trên thị trường chủ yếu đến từ các cơ sở sản xuất quy mô nhỏ với công nghệ đơn giản, chỉ sử dụng các dòng vi sinh vật phổ biến và quy trình chưa tối ưu. Hiện tại, ngoại trừ một số cơ sở đầu tư công nghệ sản xuất phân hữu cơ tiên tiến, đồng bộ từ nhà máy tới men vi sinh thì đa phần các doanh nghiệp khác vẫn sử dụng dây chuyền thiết

bị đơn giản, chỉ dừng lại ở việc sử dụng vi sinh vật phổ biến để ủ nguyên liệu hoặc bổ sung một số chất sinh học, chất điều hòa sinh trưởng cơ bản. Điều này dẫn đến hiệu suất sử dụng thấp và hiệu quả không ổn định (SFI, 2021). Việc thiếu chất mang phù hợp để sản xuất phân vi sinh, hoặc điều kiện bảo quản và thời hạn sử dụng ngắn, đặc biệt là các chế phẩm dạng lỏng cũng hạn chế khả năng ứng dụng rộng rãi của phân bón vi sinh từ vi khuẩn (Nguyen et al., 2024a).

v) Chi phí phân bón vi sinh thường cao hơn phân hóa học truyền thống, trong khi nhận thức của người dân về lợi ích môi trường của sản phẩm này còn hạn chế (SFI, 2021). Nhiều cán bộ khuyến nông chưa tích cực tuyên truyền, hướng dẫn sử dụng nên nông dân thiếu động lực chuyển đổi. Đồng thời, các thông tin trên bao bì sản phẩm còn thiếu minh bạch, như không ghi rõ dòng vi sinh, thời hạn sử dụng, điều kiện bảo quản, giám độ tin cậy của người dùng đối với sản phẩm (Fasusi et al., 2021).

Như vậy, mặc dù phân bón vi sinh có tiềm năng lớn trong việc thúc đẩy nông nghiệp bền vững, nhưng các thách thức nêu trên cho thấy cần có sự cải thiện đáng kể về công nghệ sản xuất, chính sách hỗ trợ, truyền thông khoa học và sự phối hợp chặt chẽ giữa nhà khoa học, doanh nghiệp và người nông dân để phân bón vi sinh thực sự phát huy được giá trị trong thực tiễn sản xuất nông nghiệp. Do đó, để nhân rộng và nâng cao hiệu quả sử dụng phân bón vi sinh trong sản xuất nông nghiệp, việc triển khai đồng bộ nhiều giải pháp từ cấp vĩ mô đến cơ sở cần được thực hiện.

Một là việc đầu tư nghiên cứu khoa học cần được tiến hành để cải tiến công nghệ sản xuất, hoàn thiện quy trình công nghệ sản xuất phân vi sinh. Các nhà sản xuất cần đầu tư vào công nghệ lên men, kiểm soát chất lượng dòng vi sinh, lựa chọn chất mang phù hợp để bảo đảm hiệu lực sinh học cao và thời gian bảo quản lâu dài (ít nhất 1 năm ở nhiệt độ phòng) bằng cách sử dụng chất mang vô trùng hoặc chế phẩm dạng lỏng vô trùng, kể cả trong điều kiện khí hậu nhiệt đới khắc nghiệt (SFI, 2021; Díaz-Rodríguez et al., 2025). Các loại chất mang hữu cơ bền như than sinh học, rác thải hữu cơ hoặc chất nền sinh học tổng hợp nên được nghiên cứu và ứng dụng để nâng cao khả năng sống sót của vi sinh vật trong đất (Mohammadi & Sohrabi, 2012).

Hai là cần có cơ chế chính sách hỗ trợ, khuyến khích doanh nghiệp và hợp tác xã tham gia sản xuất và phân phối phân bón vi sinh; đặc biệt hoàn thiện khung pháp lý và hệ thống tiêu chuẩn kỹ thuật, chứng nhận, nhãn mác sản phẩm là hết sức cần thiết

để tăng độ tin cậy của nông dân và đảm bảo tính minh bạch trên thị trường. Đồng thời, việc cập nhật và hoàn thiện hệ thống quản lý cần được tiến hành theo hướng đồng bộ, bất kịp sự phát triển nhanh chóng của lĩnh vực vi sinh vật thúc đẩy sinh trưởng thực vật - ứng viên tiềm năng trong sản xuất phân bón vi sinh. Một khung quản lý hiệu quả nên có hướng dẫn rõ ràng cho quy trình nghiên cứu, phát triển, thử nghiệm và đăng ký sản phẩm, nhằm bảo đảm tính an toàn, ổn định và hiệu quả sinh học của các chế phẩm trước khi được ứng dụng trong thực tiễn nông nghiệp (Vassileva et al., 2021).

Ba là công tác truyền thông, đào tạo nông dân cần được tăng cường để thay đổi quan niệm rằng chế phẩm vi sinh kém tin cậy hơn các loại phân thuốc hóa học thông thường. Trong đó, các chương trình tập huấn, khuyến nông để nâng cao nhận thức cộng

đồng nông dân về lợi ích lâu dài của vi sinh trong việc cải thiện sức khỏe và tính bền vững của đất là quan trọng nhất. Đồng thời, việc phổ biến cách sử dụng và bảo quản chế phẩm vi sinh là rất cần thiết, điều này nhằm đảm bảo hiệu quả thực tế trên đồng ruộng (Kaur & Purewal et al., 2019; Díaz-Rodríguez et al., 2025).

Tóm lại, phân bón vi sinh từ vi khuẩn là một giải pháp quan trọng và bền vững trong sản xuất nông nghiệp, giúp cải thiện năng suất cây trồng trong điều kiện giảm phân hoá học, tăng khả năng hấp thu dinh dưỡng, cải thiện sức khỏe đất và giảm thiểu tác động bất lợi đến môi trường, góp phần thúc đẩy mô hình canh tác thân thiện và thích ứng với biến đổi khí hậu. Tuy nhiên, việc ứng dụng rộng rãi loại phân bón này trên thực tế vẫn còn đối mặt với nhiều thách thức và cần có sự phối hợp của các bên liên quan.

TÀI LIỆU THAM KHẢO (REFERENCES)

- Backer, R., Rokem, J. S., Ilangumaran, G., Lamont, J., Praslickova, D., Ricci, E., Subramanian, S., & Smith, D. L. (2018). Plant growth-promoting rhizobacteria: Context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1473. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01473>
- Bhardwaj, A., Sharma, S., & Saini, A. (2024). Biofertilizers: Harnessing microbial power for sustainable agriculture. In A. K. Rai, P. Chandra, N. Basak, P. Sundha, & R. K. Yadav (Eds), *Plant-Microbial Interactions for Sustainable Agriculture*, (pp. 312–351). Cambridge Scholars Publishing.
- Chandwani, S., & Amaresan, N. (2024). ACC deaminase producing bacteria alleviate the polyethylene glycol induced drought stress in black gram (*Vigna mungo* L.) by enhancing nutrient uptake and soil respiration activity. *Scientia Horticulturae*, 331, 113111. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113111>
- Chen, Y. H., Yang, X. Z., Li, Z., An, X. H., Ma, R. P., Li, Y. Q., & Cheng, C. G. (2020). Efficiency of potassium-solubilizing *Paenibacillus mucilaginosus* for the growth of apple seedling. *J. Integr. Agric.*, 19, 2458–2469. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(20\)63303-2](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(20)63303-2)
- Compant, S., Samad, A., Faist, H., & Sessitsch, A. (2019). A review on the plant microbiome: Ecology, functions, and emerging trends in microbial application. *Journal of Advanced Research*, 19, 29–37. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2019.03.004>
- Cui, K., Xu, T., Chen, J., Yang, H., Liu, X., Zhuo, R., Peng, Y., Tang, W., Wang, R., Chen, L., Zhang, X., Zhang, Z., He, Z., Wang, X., Liu, C., Chen, Y., & Zhu, Y. (2022). Siderophores, a potential phosphate solubilizer from the endophyte *Streptomyces* sp. CoT10, improved phosphorus mobilization for host plant growth and rhizosphere modulation. *Journal of cleaner production*, 367, 133110. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133110>
- Danish, S., Zafar-ul-Hye, M., Mohsin, F., & Hussain, M. (2020). ACC-deaminase producing plant growth promoting rhizobacteria and biochar mitigate adverse effects of drought stress on maize growth. *PLoS ONE*, 15(4), e0230615. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0230615>
- Díaz-Rodríguez, A. M., Parra Cota, F. I., Cira Chávez, L. A., García Ortega, L. F., Estrada Alvarado, M. I., Santoyo, G., & de los Santos-Villalobos, S. (2025). Microbial inoculants in sustainable agriculture: Advancements, challenges, and future directions. *Plants*, 14(2), 191. <https://doi.org/10.3390/plants14020191>
- dos Santos, R. M., Diaz, P. A. E., Lobo, L. L. B., & Rigobelo, E. C. (2020). Use of plant growth-promoting Rhizobacteria in maize and sugarcane: Characteristics and applications. *Front. Sustain. Food Syst*, 4, 136. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00136>
- Etesami, H., Emami, S., & Ali Alikhani, H. A. (2017). Potassium solubilizing bacteria (KSB): Mechanisms, promotion of plant growth, and future prospects - a review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 17(4), 897-911. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162017000400005>
- Etesami, H., Jeong, B. R., & Glick, B. R. (2021). Contribution of arbuscular mycorrhizal fungi, phosphate-solubilizing bacteria, and silicon to P

- uptake by plant. *Frontiers in plant science*, 12, 699618. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.699618>
- Farooq, S., Danish, S., Zafar-ul-Hye, M., Mohsin, F., & Hussain, M. (2020). ACC-deaminase producing plant growth promoting Rhizobacteria and biochar mitigate adverse effects of drought stress on maize growth. *PLoS ONE*, 15(4), e0230615. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0230615>
- Fasusi, O., Cruz, C., & Babalola, O. (2021). Agricultural sustainability: Microbial biofertilizers in rhizosphere management. *Agriculture*, 11, 163. <https://doi.org/10.3390/agriculture11020163>
- Feng, Z. J., Nie, W. B., Ma, Y. P., Li, Yu-chen, Ma, X. Y., & Zhu, H. Y. (2023). Effects of urea solution concentration on soil hydraulic properties and water infiltration capacity. *The Science of the total environment*, 898, 165471. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165471>
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2021). *The state of the world's land and water resources for food and agriculture – Systems at breaking point*. <https://openknowledge.fao.org/items/55def12b-2a81-41e5-91dc-ac6c42f1cd0f>
- Glick, B. R. (2012). Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications. *Scientifica*, 963401. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3820493/>
- Grace, P., Rosa, D. D., Shcherbak, I., Strazzabosco, A., Rowlings, D., Scheer, C., Barton, L., Wang, W., Schwenke, G., Armstrong, R., Porter, I., & Bell, M. (2023). Revised emission factors for estimating direct nitrous oxide emissions from nitrogen inputs in Australia's agricultural production systems: A meta-analysis. *Soil Research*, 62(1), SR23070. <https://doi.org/10.1071/SR23070>
- Habibi, S., Djedidi, S., Ohkama-Ohtsu, N., Sarhadi, W. A., Kojima, K., Rallos, R. V., Ramirez, M. D. A., Yamaya, H., Sekimoto, H., & Yokoyama, T. (2019). Isolation and screening of indigenous plant growth-promoting *Rhizobacteria* from different rice cultivars in afghanistan soils. *Microbes Environments*, 34, 347–355. <https://doi.org/10.1264/jsme2.ME18168>
- Hassen, A. I., Bopape, F. L., & Sanger, L. K. (2016). Microbial inoculants as agents of growth promotion and abiotic stress tolerance in plants. In: D. Singh, H. Singh, R. Prabha (Eds), *Microbial inoculants in sustainable agricultural productivity*, (pp. 23–36). Springer, New Delhi. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2647-5_2
- Huang, W. Z. (2024). Boosting soil health: The role of rhizobium in legume nitrogen fixation. *Molecular Soil Biology*, 15(3), 129-139. <https://doi.org/10.5376/msb.2024.15.0014>
- Jamil, M., Zeb, S., Anees, M., Roohi, A., Ahmed, I., Rehman, S., & Rha, E. S. (2014). Role of *Bacillus licheniformis* in phytoremediation of nickel contaminated soil cultivated with rice. *International journal of phytoremediation*, 16(6), 554–571. <https://doi.org/10.1080/15226514.2013.798621>
- Jan, M., Shah, G., Masood, S., Iqbal Shinwari, K., Hameed, R., Rha, E. S., & Jamil, M. (2019). *Bacillus Cereus* enhanced phytoremediation ability of rice seedlings under cadmium toxicity. *BioMed research international*, 2019, 8134651. <https://doi.org/10.1155/2019/8134651>
- Kaur, P. & Purewal, S. S. (2019). Biofertilizers and their role in sustainable agriculture. In B. Giri, R. Prasad, Q. S. Wu, & A. Varma (Eds), *Biofertilizers for sustainable agriculture and environment*, (pp. 285–300), Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-18933-4_12
- Klaunig, J. E., Kamendulis, L. M., & Hocevar, B. A. (2010). Oxidative stress and oxidative damage in carcinogenesis. *Toxicologic Pathology*, 38(1), 96–109. <https://doi.org/10.1177/0192623309356453>
- Kulkova, I., Dobrzyński, J., Kowalczyk, P., Bełżęcki, G., & Kramkowski, K. (2023). Plant growth promotion using *Bacillus cereus*. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(11), 9759. <https://doi.org/10.3390/ijms24119759>
- Kumar, S. R., David, E. M., Pavithra, G. J., Kumar, G. S., Lesharadevi, K., Akshaya, S., Basavaraddi, C., Navyashree, G., Arpitha, P. S., Sreedevi, P., Zainuddin, K., Firdous, S., Babu, B. R., Prashanth, M. U., Ravikumar, G., Basavaraj, P., Chavana, S. K., Kumar, V. M. L. D., Parthasarathi, T., & Subbian, E. (2024). Methane-derived microbial biostimulant reduces greenhouse gas emissions and improves rice yield. *Frontiers in Plant Science*. 15, 1432460. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1432460>
- Lamont, J. R., Wilkins, O., Bywater-Ekegård, M., & Smith, D. L. (2017). From yogurt to yield: Potential applications of lactic acid bacteria in plant production. *Soil Biology and Biochemistry*, 111, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.03.015>
- Ly, X. N. T., Nguyen, H. P. T., Le, T. T. M., Vo, T. T. B., Le, T. M., Le, Q. T., Nguyen, D. T. X., Le, T. V., & Nguyen, K. Q. (2024) Supplementation of P-solubilizing purple nonsulfur bacteria, *Rhodospseudomonas palustris* improved soil fertility, P nutrient, growth, and yield of *Cucumis melo* L. *Open Agriculture*, 9(1), 20220247. <https://doi.org/10.1515/opag-2022-0247>

- Malyan, S. K., Bhatia, A., Tomer, R., Harit, R. C., Jain, N., Bhowmik, A., & Kaushik, R. (2021). Mitigation of yield-scaled greenhouse gas emissions from irrigated rice through Azolla, Blue-green algae, and plant growth-promoting bacteria. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(37), 51425–51439. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14210-z>
- Minamisawa, K. (2022). Mitigation of greenhouse gas emission by nitrogen-fixing bacteria. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 87(1), 7–12. <https://doi.org/10.1093/bbb/zbac177>
- Mohammadi, K., & Sohrabi, Y. (2012). Bacterial biofertilizers for sustainable crop production: A review. *ARI Bulletin of Agricultural Research Institute*, 1(1), 1–14.
- Ngo, P. T., Chau, C. H. T., & Pham, N. T. B. (2024). The effect of *Burkholderia vietnamiensis* BV2 on IR50404 rice cultivar grown in Binh Minh – Vinh Long. *CTU Journal of Science*, 60(Natural Sciences), 366-373 (in Vietnamese). <https://doi.org/10.22144/ctu.jos.2024.357>
- Nguyen, H. T., Tran, D. T., & Nguyen, H. T. (2016). Effectiveness of microbial inoculants for groundnuts grown in marine sandy soil of Nghe An and Binh Dinh provinces. *Journal of Vietnam Agricultural Science and Technology*, 1(62), 8-13 (in Vietnamese).
- Nguyen, K. Q., Le, D. T., Ly, X. N. T., Le, Q. T., & Nguyen, N. K. (2024a). The potential of phosphorus-solubilizing purple nonsulfur bacteria in agriculture: Present and future perspectives. *Open Agriculture*, 9(1), 20220328. <https://doi.org/10.1515/opag-2022-0328>
- Nguyen, K. Q., Le, T. V., Cao, G. T., Ly, X. N. T., Le, T. T. M., Isao, A., & Ichi, S. J. (2023). Improvement of nutrient uptake, yield of black sesame (*Sesamum indicum* L.), and alluvial soil fertility in dyke by spent rice straw from mushroom cultivation as biofertilizer containing potent strains of *Rhodopseudomonas palustris*. *The Scientific World Journal*, 1, 1954632. <https://doi.org/10.1155/2023/1954632>
- Nguyen, K. Q., Ngo, T. V., Mac, N. K., Ly, X. N. T., Le, T. T. M., Le, Q. T., & Ngo, P. T. (2024b). Potency of endophytic nitrogen-fixing bacteria *Burkholderia tropica* L-VT08c and *Enterobacter cloacae* N-VT01 in improving soil fertility and pineapple yield on acid sulfate soil. *Scientia Horticulturae*, 331, 113153. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113153>
- Nguyen, L. T. M., Le, H. V., Nguyen, T. D., Dinh, V. M., Dinh, H. T., & Nguyen, H. T. (2025). Application of beneficial bacteria to improve agricultural soil quality. *Journal of Tropical Science and Engineering*, 37, 104-119 (in Vietnamese). <https://doi.org/10.58334/vrtc.jst.n37.10>
- Nguyen, L. V., & Cao, D. N. (2012). Effect of biofertilizer on yield of vegetables (fruit-eating vegetable) cultivated on alluvial soil of Omon district, Can Tho city. *CTU Journal of Science*, 23a, 213-223 (in Vietnamese).
- Nguyen, N. K., Huynh, H. H., Dang, N. T. Y., Nguyen, O. T. K., & Le, X. T. (2022). Efficacy of NPISi microbial product on growth, yield of green onion (*Allium fistulosum*) and some alluvial soil characteristics under greenhouse conditions. *CTU Journal of Science*, 58(3B), 176-190 (in Vietnamese). <https://doi.org/10.22144/ctu.jvn.2022.079>
- Pei, B., Liu, T., Xue, Z., Cao, J., Zhang, Y., Yu, M., Liu, E., Xing, J., Wang, F., Ren, X., & Zhang, Z. (2025). Effects of biofertilizer on yield and quality of crops and properties of soil under field conditions in China: A meta-analysis. *Agriculture*, 15(10), 1066. <https://doi.org/10.3390/agriculture15101066>
- Pham, T. V. (2005). *Research on technology and production of new multi-strain microbial fertilizers and functional fertilizers for cultivation and planting in some ecological regions* (Summary Report on Science and Technology). Vietnam Academy of Agricultural Sciences (in Vietnamese).
- Prashar, D., Singh, A., Dhama, V., Singh, P. K., Kumar, M., Kumar, S., Pandey, D., & Verma, G. (2025). Effect of organic and inorganic fertilizers on crop yield and soil fertility: A comprehensive review. *Journal of Experimental Agriculture International*, 47(2), 16–22. <https://doi.org/10.9734/jeai/2025/v47i23261>
- Qin, H., Wang, Z., Sha, W., Song, S., Qin, F., & Zhang, W. (2024). Role of plant-growth-promoting rhizobacteria in plant machinery for soil heavy metal detoxification. *Microorganisms*, 12(4), 700. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12040700>
- Rashid, M. I., Mujawar, L. H., Shahzad, T., Almeelbi, T., Ismail, I. M. I., & Oves, M. (2016). Bacteria and fungi can contribute to nutrients bioavailability and aggregate formation in degraded soils. *Microbiological Research*, 183, 26-41. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2015.11.007>
- Sarkar, A., Ghosh, P.K., Pramanik, K.; Mitra, S., Soren, T.; Pandey, S., Mondal, M.H. & Maiti, T.K. (2018). A halotolerant *Enterobacter* sp. displaying ACC deaminase activity promotes rice seedling growth under salt stress. *Res. Microbiol.*, 169, 20–32. <https://doi.org/10.1016/j.resmic.2017.08.005>

- Singh, P., Chauhan, P. K., Upadhyay, S. K., Singh, R. K., Dwivedi, P., Wang, J., Jain, D., & Jiang, M. (2022a). Mechanistic insights and potential use of siderophores producing microbes in rhizosphere for mitigation of stress in plants grown in degraded land. *Frontiers in microbiology*, 13, 898979. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.898979>
- Singh, R. P., Ma, Y., & Shadan, A. (2022b). Perspective of ACC-deaminase producing bacteria in stress agriculture. *J. Biotechnol.*, 352, 36–46. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2022.05.002>
- Soils and Fertilizers Institute (SFI). (2021). *Analysis and evaluation of measures for using organic fertilizers and microbial organic fertilizers in agricultural production*. <https://sfri.org.vn/chitiet-tin/323/phan-tich-danh-gia-bien-phap-su-dung-phan-huu-co-va-phan-huu-co-vi-sinh-trong-san-xuat-nong-nghiep> (in Vietnamese).
- Sun, W., Shahrajabian, M. H., & Soleymani, A. (2024). The roles of plant-growth-promoting Rhizobacteria (PGPR)-Based biostimulants for agricultural production systems. *Plants*, 13(5), 613. <https://doi.org/10.3390/plants13050613>
- Tan, M., Feng, T., Wang, C., Hao, X., & Yu, H. (2025). Effects of microbial agents on soil improvement-A review and bibliometric Analysis. *Agronomy*, 15(5), 1223. <https://doi.org/10.3390/agronomy15051223>
- Tran, C. V., Bui, H. V., Le, L. T. B., Nguyen, H. X., Pham, H. Q., & Bien, M. V. (2018). *Textbook of environmental microbiology*. Hanoi Polytechnic Publishing House (in Vietnamese).
- Tran, D. T., Vo, T. T., Dao, T. V., & Vo, H. C. (2017). Completion of production technology of functional micro-products supplemented with biochar. *Journal of Vietnam Agricultural Science and Technology*, 10(83), 84-91 (in Vietnamese).
- Tran, H. N., Tran, G. T. N., Phan, N. N., Chan, V. T. B., & Nguyen, K. Q. (2022). Potential of phosphorus solubilizing purple nonsulfur bacteria isolated from acid sulfate soil in improving soil property, nutrient uptake, and yield of pineapple (*Ananas comosus* L. Merrill) under acidic stress. *Applied and Environmental Soil Science*, 1, 8693479. <https://doi.org/10.1155/2022/8693479>
- Tripathi, A., Pandey, M., & Sharma, P. (2022). A review: Effects of nitrogenous fertilizers on soil (pH, microbial community, greenhouse gases emission and carbon pool). *Environmental Contaminants Reviews*, 5(2), 44-48. <http://doi.org/10.26480/ecr.02.2022.44.48>
- VAAS. (2024). *Increasing the use of organic fertilizers, relieving pressure on environmental pollution*. <https://vaas.vn/vi/nong-nghiep-trong-nuoc/gia-tang-su-dung-phan-bon-huu-co-giai-toa-nhung-ap-luc-ve-o-nhiem-moi-truong> (in Vietnamese).
- Vassileva, M., Malusà, E., Sas-Paszt, L., Trzcinski, P., Galvez, A., Flor-Peregrin, E., Shilev, S., Canfora, L., Mocali, S., & Vassilev, N. (2021). Fermentation strategies to improve soil bio-inoculant production and quality. *Microorganisms*, 9(6), 1254. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9061254>
- Vietnam Academy of Agricultural Sciences (VAAS). (2020). *Report on the investigation of the current status of fertilizer use in key crop growing areas*. Agricultural Publishing House (in Vietnamese).
- Vu, L. V., Chau, E. T. H., Le, T. B. T., Chan, D. V., & Nguyen, N. K. (2024). Effects of combined nitrogen-fixing bacteria (*Gluconacetobacter diazotrophicus*) with nitrogen fertilization on the growth and rice yield. *Vietnam Soil Science*, 75, 27-31 (in Vietnamese).
- Wang, Y., Peng, S., Hua, Q., Qiu, C., Wu, P., Liu, X. & Lin, X. (2021). The long-term effects of using phosphate-solubilizing bacteria and photosynthetic bacteria as biofertilizers on peanut yield and soil bacteria community. *Front. Microbiol.*, 12, 693535. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.693535>
- Wei, X., Xie, B., Wan, C., Song, R., Zhong, W., Xin, S., & Song, K. (2024). Enhancing soil health and plant growth through microbial fertilizers: Mechanisms, benefits, and sustainable agricultural practices. *Agronomy*, 14(3), 609. <https://doi.org/10.3390/agronomy14030609>
- Xu, P. & Wang, E. (2023). Diversity and regulation of symbiotic nitrogen fixation in actinorhizal and legume symbioses. *Current Biology*, 33(11), R543-R559. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2023.04.053>
- Zhang, L., Zhao, Z., Jiang, B., Baoyin, B., Cui, Z., Wang, H., Li, Q., & Cui, J. (2024a). Effects of long-term application of nitrogen fertilizer on soil acidification and biological properties in China: A meta-analysis. *Microorganisms*, 12(8), 1683. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12081683>
- Zhang, X., Wu, J., & Kong, Z. (2024b). Cellular basis of legume–rhizobium symbiosis. *Plan communication*, 5(11), 101045. <https://doi.org/10.1016/j.xplc.2024.101045>
- Zhang, X., Davidson, E. A., Mauzerall, D. L., Searchinger, T. D., Dumas, P., & Shen, Y. (2019). Managing nitrogen for sustainable development. *Nature*, 528(7580), 51–59. <https://doi.org/10.1038/nature15743>
- Zhou, J., Jiang, X., Wei, D., Zhao, B., Ma, M., Chen, S., Cao, F., Shen, D., Guan, D., & Li, J. (2017). Consistent effects of nitrogen fertilization on soil microbial communities in black soils for two crop seasons. *Scientific Reports*, 7, 3267. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-03539-6>