



DOI: 10.22144/ctujos.2026.197

ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC YẾU TỐ DINH DƯỠNG VÀ MÔI TRƯỜNG NUÔI CẤY ĐẾN KHẢ NĂNG HÒA TAN LÂN CỦA *Enterobacter hormaechei* GC1.3 PHÂN LẬP TỪ ĐẤT RỄ LÚA HOANG GÒ CÔNG – ĐỒNG THÁP

Nguyễn Thị Hồng Xuyên^{1,2}, Tôn Nữ Thanh Nhân², Phan Ngọc Như², Lê Thị Tuyết Cam², Huỳnh Thị Như Huỳnh², Nguyễn Thị Tuyết Nhung², Ký Thiện², Đỗ Tấn Khang¹ và Trần Thị Giang^{1,*}

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

²Khoa Công nghệ Sinh - Hóa - Thực phẩm, Trường Đại học Kỹ thuật - Công nghệ Cần Thơ, Việt Nam

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

Thông tin chung (Article Information)

Nhận bài (Received): 08/06/2026

Sửa bài (Revised): 23/06/2026

Duyệt đăng (Accepted): 23/08/2026

Title: Effects of nutritional and culture conditions on phosphate solubilization by *enterobacter hormaechei* GC1.3 Isolated from the Rhizosphere Soil of Wild Rice in Go Cong, Dong Thap province

Author(s): Nguyen Thi Hong Xuyen², Ton Nu Thanh Nhan², Phan Ngoc Nhu², Le Thi Tuyen Cam², Huynh Thi Nhu Huynh², Nguyen Thi Tuyen Nhung², Ky Thien², Do Tan Khang¹ and Tran Thi Giang^{1,*}

Affiliation(s): ¹Institute of Food and Biotechnology, Can Tho University, Viet Nam; ²Faculty of Biotechnology, Chemical Engineering and Food Technology, Can Tho University of Technology, Viet Nam

TÓM TẮT

Nghiên cứu được thực hiện nhằm đánh giá ảnh hưởng của các yếu tố dinh dưỡng và điều kiện nuôi cấy đến khả năng hòa tan lân của chủng *Enterobacter hormaechei* GC1.3 phân lập từ đất vùng rễ lúa hoang tại Gò Công, Đồng Tháp. Chủng vi khuẩn được nuôi cấy trên môi trường NBRIP và khảo sát ảnh hưởng của nồng độ phosphate vô cơ, nguồn carbon, nguồn nitrogen, sự kết hợp carbon-nitrogen, các dạng phosphate khó tan (FePO_4 và AlPO_4), nhiệt độ và điều kiện nuôi cấy. Kết quả cho thấy chủng GC1.3 đạt hiệu quả hòa tan lân cao nhất trong môi trường chứa 5 g/L $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, 10 g/L glucose và 0,1 g/L $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. Tổ hợp glucose và $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ là điều kiện tối ưu cho hàm lượng lân hòa tan đạt 800,07 mg/L. Chủng có khả năng hòa tan FePO_4 hiệu quả hơn AlPO_4 , với hàm lượng lân hòa tan cao nhất đạt 142,96 mg/L. Điều kiện nuôi lắc ở 25 - 30°C cho hiệu quả hòa tan lân cao nhất. Kết quả nghiên cứu cho thấy *E. hormaechei* GC1.3 có tiềm năng ứng dụng trong sản xuất chế phẩm vi sinh nhằm tăng khả năng hấp thu lân của cây lúa, giảm sử dụng phân bón hóa học và góp phần phát triển nông nghiệp bền vững.

Từ khóa: *Enterobacter hormaechei* GC1.3, glucose, hòa tan lân, phosphate khó tan, vi khuẩn vùng rễ lúa hoang

ABSTRACT

This study evaluated the effects of nutritional and environmental culture conditions on the phosphate-solubilizing ability of *Enterobacter hormaechei* GC1.3 isolated from the rhizosphere soil of wild rice in Go Cong, Dong Thap Province, Vietnam. The strain was cultivated in NBRIP medium, and the effects of inorganic phosphate concentration, carbon sources, nitrogen sources, carbon-nitrogen combinations, insoluble phosphate forms (FePO_4 and AlPO_4), temperature, and cultivation conditions were investigated. The results showed that strain GC1.3 exhibited the highest phosphate-solubilizing activity in a medium containing 5 g/L $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, 10 g/L glucose, and 0.1 g/L $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. The combination of glucose and $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ was identified as the optimal condition, yielding a maximum soluble phosphate concentration of 800.07 mg/L. The strain solubilized FePO_4 more effectively than AlPO_4 , with the highest soluble phosphate concentration reaching 142.96 mg/L. Shaking cultivation at 25-30°C resulted in the greatest phosphate-solubilizing efficiency. These findings demonstrate the potential of *E. hormaechei* GC1.3 as a microbial inoculant for enhancing phosphorus availability and uptake in rice cultivation, reducing chemical fertilizer inputs, and supporting sustainable agricultural production.

Keywords: *Enterobacter hormaechei* GC1.3, glucose, insoluble phosphate, wild rice rhizosphere bacteria

1. GIỚI THIỆU

Nguyên tố phospho (P) được xem là nguyên tố đa lượng thiết yếu thứ hai đối với cây trồng, tham gia trực tiếp vào các quá trình sinh trưởng, quang hợp, chuyển hóa năng lượng, tổng hợp acid nucleic và phân chia tế bào (Bilal et al., 2021; Chouyia et al., 2022; Elhaissoufi et al., 2022; Lambers, 2022). Tuy nhiên, cây chỉ hấp thu được P ở dạng orthophosphate hòa tan như H_2PO_4^- và HPO_4^{2-} (Pan & Cai, 2023; Santoro et al., 2024). Mặc dù tổng lượng P trong đất khá cao (1,0 - 2,5%) nhưng tồn tại ở dạng cây không thể sử dụng do P dễ kết tủa với các ion Ca^{2+} , Fe^{3+} và Al^{3+} , đồng thời bị hấp phụ mạnh lên khoáng đất, làm hạn chế khả năng khuếch tán và hấp thu của cây (Richardson & Simpson, 2011; Bilal et al., 2021; Pan & Cai, 2023). Vì vậy, thiếu hụt P là vấn đề phổ biến trong nông nghiệp, gây giảm năng suất đáng kể. Để khắc phục vấn đề trên, phân lân hóa học được sử dụng rộng rãi nhằm đáp ứng nhu cầu lương thực toàn cầu (Akanmu et al., 2023; Wendimu et al., 2023). Tuy nhiên, việc lạm dụng phân lân dẫn đến suy giảm độ phì đất, thất thoát P và ô nhiễm môi trường (Wang et al., 2024). Do đó, việc phát triển các giải pháp sinh học nhằm nâng cao hiệu quả sử dụng P đang được quan tâm mạnh mẽ (Pan & Cai, 2023).

Vi sinh vật hòa tan phosphate (phosphate-solubilizing microorganisms – PSM), đặc biệt là vi khuẩn hòa tan phosphate (PSB), được xem là giải pháp tiềm năng giúp chuyển hóa lân khó tan thành dạng P cây hấp thu được. Theo Malusá et al. (2012), phân bón vi sinh chứa PSB là chế phẩm gồm một hoặc nhiều chủng vi sinh vật có lợi kết hợp với chất mang phù hợp. Các chế phẩm này không chỉ góp phần giảm chi phí sản xuất mà còn hạn chế tác động tiêu cực đến môi trường so với phân hóa học (Bi et al., 2019). Vi sinh vật giữ vai trò trung tâm trong các chu trình sinh địa hóa và duy trì độ phì trong đất (Sokol et al., 2022), trong khi PSB thúc đẩy chu trình P bằng cách giải phóng phosphate từ các dạng không tan (Mosimann et al., 2017; Pan & Cai, 2023). *Pantoea asiatica* JP233 có khả năng tăng hòa tan P và thúc đẩy sinh trưởng cả chua (Tang et al., 2025). Tuy nhiên, hiệu quả của PSB ngoài đồng ruộng vẫn chưa ổn định do ảnh hưởng của điều kiện môi trường, khả năng thích nghi và độ bền của chế phẩm.

Cơ chế hòa tan phosphate quan trọng nhất của PSB là tiết acid hữu cơ như acetate, lactate, malate, oxalate, succinate, citrate, gluconate và ketogluconate để tạo phức với Ca^{2+} , Fe^{3+} và Al^{3+} , từ đó giải phóng phosphate khỏi các hợp chất không

tan. Trong số các acid hữu cơ, acid gluconic được nghiên cứu nhiều nhất và được tổng hợp thông qua hệ enzyme glucose dehydrogenase phụ thuộc pyrroloquinoline quinone (PQQ), với sự tham gia của các gen *pqqA-pqqG* cùng các gen cấu trúc *gdhA* và *gdhB* (An & Moe, 2016). Ngoài ra, các acid hữu cơ thuộc chu trình TCA như citrate, malate và succinate cũng góp phần quan trọng vào quá trình hòa tan P thông qua các con đường enzyme chịu ảnh hưởng bởi trạng thái oxy hóa khử và điều kiện môi trường (Bharwad & Rajkumar, 2020).

Trong số các vi khuẩn hòa tan phosphate, chi *Enterobacter* nổi bật nhờ khả năng thích nghi cao và trao đổi chất linh hoạt. Các loài thuộc chi này có thể chuyển đổi giữa hô hấp hiếu khí và lên men kỵ khí tùy thuộc vào điều kiện oxy. *Enterobacter hormaechei* có khả năng sản xuất đồng thời nhiều acid hữu cơ như gluconic, glutamic, ketoglutamic, malic và succinic (Mardad et al., 2013). Chủng *Enterobacter* sp. ITCB-09 cũng được ghi nhận có khả năng hòa tan phosphate mạnh thông qua cơ chế tiết acid hữu cơ (Mendoza-arroyo et al., 2020). Tuy nhiên, hiệu quả hòa tan P giữa các chủng *Enterobacter* có sự khác biệt đáng kể, cụ thể *Enterobacter ludwigii* GMG278 đạt 53,97 $\mu\text{g/mL}$, GMG291 đạt 106,82 $\mu\text{g/mL}$, GMG378 đạt 53,66 $\mu\text{g/mL}$ và *Enterobacter soli* GMG1156 đạt 134,69 $\mu\text{g/mL}$ (Sokolova et al., 2024, 2025). Những khác biệt này cho thấy vai trò của các yếu tố di truyền trong cơ chế hòa tan lân. Để làm rõ cơ chế này, Sokolova et al. (2025) đã kết hợp phân tích HPLC nhằm xác định các acid hữu cơ tiết ra trong môi trường chứa AlPO_4 , FePO_4 và $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$; đồng thời, việc phân tích bộ gen so sánh cũng đã được thực hiện để liên hệ biến thể di truyền với kiểu hình hòa tan phosphate.

Khả năng hòa tan lân của vi sinh vật chịu ảnh hưởng bởi các nguồn dinh dưỡng và điều kiện nuôi cấy khác nhau. Việc bổ sung nguồn carbon và năng lượng cho vi sinh vật giúp thúc đẩy quá trình khoáng hóa P, nhưng hiệu quả phụ thuộc vào loại đất và hàm lượng P ban đầu (Rawal et al., 2022; John et al., 2024; Raniero et al., 2025). Việc nuôi cấy vi sinh vật trong điều kiện hiếu khí giúp tăng cường tiếp xúc giữa vi sinh vật, enzyme và cơ chất, đồng thời thúc đẩy sản sinh acid hữu cơ. Ngược lại, điều kiện thiếu oxy có thể huy động P thông qua cơ chế khử các phức hợp sắt-phosphate (Anderson et al., 2021; Nguyen et al., 2023). Các đặc điểm di truyền liên quan đến chuyển hóa carbohydrate và khả năng thích nghi môi trường cũng ảnh hưởng đến hiệu quả hòa tan phosphate của vi sinh vật dưới các điều kiện nuôi cấy khác nhau (Pan et al., 2025). Nhìn chung,

dù nhiều chủng PSM thể hiện khả năng hòa tan lân tốt trong điều kiện phòng thí nghiệm nhưng hiệu quả ngoài đồng ruộng vẫn còn biến động lớn. Vì vậy, việc nghiên cứu sâu hơn về cơ chế sinh hóa và phân tử của quá trình hòa tan phosphate cần tiếp tục được thực hiện nhằm tối ưu hóa khả năng ứng dụng PSB trong nông nghiệp bền vững (Sokolova et al., 2025).

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Chuẩn bị dòng *Enterobacter hormaechei* GC1.3 cho các thí nghiệm khảo sát

Dòng vi khuẩn GC1.3 được phân lập từ mẫu đất vùng rẫy lúa hoang thu thập tại Gò Công, Đồng Tháp. Vi khuẩn GC1.3 sau phân lập được xác định khả năng hòa tan lân vô cơ dựa trên chỉ số hòa tan lân (PSI) theo công thức của Alemneh et al. (2025). Hàm lượng lân hòa tan được phân tích bằng phương pháp hiện màu molybdate (Murphy & Riley, 1962). Dòng GC1.3 thể hiện khả năng hòa tan lân tương đối cao, với chỉ số PSI đạt $1,88 \pm 0,14$ sau 10 ngày nuôi cấy và hàm lượng lân hòa tan đạt $809,91 \pm 14,17$ mg/L, thuộc nhóm các chủng có hiệu quả hòa tan lân cao nhất trong số 43 chủng được phân lập và khảo sát. Chủng GC1.3 được định danh Average Nucleotide Identity (ANI) dựa trên dữ liệu genome hoàn chỉnh (Jain et al., 2018). Kết quả giải trình tự và phân tích bộ gen cho thấy dòng vi khuẩn GC1.3 được định danh ANI là *Enterobacter hormaechei* GC1.3 (*E. hormaechei* GC1.3). Bộ gen của chủng đã được đăng ký và công bố trên cơ sở dữ liệu DDBJ/ENA/GenBank với mã số truy cập (Accession number) JBYFBU000000000, thuộc dự án BioProject PRJNA1465318 và BioSample SAMN59741156.

2.2. Khảo sát các yếu tố dinh dưỡng ảnh hưởng đến khả năng hòa tan phosphate của PSB

Chuẩn bị dịch vi khuẩn: Vi khuẩn *E. hormaechei* GC1.3 được nuôi tăng sinh trong môi trường Luria-Bertani (LB) ở nhiệt độ $30 \pm 2^\circ\text{C}$ và lắc ở tốc độ 200 rpm trong 12–24 giờ. Mật độ tế bào được xác định bằng phương pháp đo mật độ quang ở bước sóng 600 nm ($\text{OD}_{600} = 0,8$), tương ứng với khoảng 10^8 CFU/mL (Bertani, 1951).

Môi trường NBRIP (Nautiyal, 1999) gồm glucose 10,0 g/L; $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 5,0 g/L; $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 0,1 g/L; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0,25 g/L; $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 5,0 g/L; KCl 0,20 g/L và agar 15 g/L được sử dụng để đánh giá khả năng hòa tan phosphate của vi khuẩn. Tùy theo mục đích của từng thí nghiệm, môi trường được bổ sung các nguồn dinh dưỡng hoặc các mức xử lý khác nhau. Song song với các nghiệm thức có cấy vi

khuẩn, các bình chứa cùng môi trường nhưng không cấy vi khuẩn được bố trí làm đối chứng âm và được sử dụng làm mẫu trắng (blank) trong quá trình xác định hàm lượng lân hòa tan.

Nhiệt độ nuôi cấy ($30 \pm 2^\circ\text{C}$) và thời gian nuôi cấy (10 ngày) được duy trì cố định cho tất cả các thí nghiệm. Thông số tối ưu thu được từ thí nghiệm trước được sử dụng làm thông số cố định cho thí nghiệm tiếp theo. Mỗi thí nghiệm được bố trí với ba lần lặp lại độc lập và kết quả được trình bày dưới dạng giá trị trung bình $\pm$ độ lệch chuẩn.

Chỉ tiêu theo dõi: PSI, pH và hàm lượng lân hòa tan (mg/L).

2.2.1. Ảnh hưởng của nồng độ lân $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$

Môi trường NBRIP đặc và lỏng được chuẩn bị tương tự mục 2.2 với $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ được bổ sung ở các nồng độ 1,0; 3,0; 5,0; 7,0 và 9,0 g/L. Dịch huyền phù vi khuẩn được cấy lên môi trường NBRIP đặc để xác định chỉ số hòa tan phosphate (PSI); đồng thời, 0,5 mL dịch vi khuẩn được bổ sung vào bình tam giác chứa 30 mL môi trường NBRIP lỏng để xác định pH và hàm lượng lân hòa tan. Các nghiệm thức được nuôi cấy ở $30 \pm 2^\circ\text{C}$ trong 10 ngày.

2.2.2. Ảnh hưởng của các nguồn và nồng độ carbohydrate khác nhau

Dịch nuôi cấy vi khuẩn và môi trường NBRIP được chuẩn bị theo mục 2.2. Thí nghiệm được bố trí theo hai nhân tố gồm nguồn carbohydrate và nồng độ carbohydrate. Nhân tố thứ nhất bao gồm bốn nguồn carbohydrate (glucose, sucrose, mannitol và maltose), được sử dụng để thay thế hoàn toàn glucose trong công thức môi trường NBRIP. Nhân tố thứ hai là nồng độ carbohydrate với 5 mức 5,0; 7,5; 10,0; 12,5 và 15,0 g/L (w/v). Các thành phần khác của môi trường được giữ không đổi nhằm đánh giá ảnh hưởng của từng nguồn và nồng độ carbohydrate đến khả năng hòa tan phosphate của chủng nghiên cứu (Agboola et al., 2023).

2.2.3. Ảnh hưởng của các nguồn và nồng độ nitrogen khác nhau

Thí nghiệm được tiến hành tương tự mục 2.2. Thí nghiệm được bố trí theo hai nhân tố, trong đó nhân tố thứ nhất là nguồn nitrogen gồm ammonium sulfate $((\text{NH}_4)_2\text{SO}_4)$, ammonium chloride (NH_4Cl) và sodium nitrate (NaNO_3) , được sử dụng để thay thế hoàn toàn nguồn nitrogen trong công thức môi trường NBRIP. Nhân tố thứ hai là nồng độ nitrogen với năm mức 0; 0,05; 0,10; 0,15 và 0,20 g/L (w/v) (Agboola et al. 2023). Các thành phần khác của môi

trường và điều kiện nuôi cấy được giữ không đổi theo mục 2.2.

2.2.4. Ảnh hưởng kết hợp của các nguồn carbon và nitrogen khác nhau

Dịch huyền phù vi khuẩn và môi trường nuôi cấy được chuẩn bị tương tự mục 2.2. Để đánh giá ảnh hưởng tương tác giữa nguồn carbon và nguồn nitrogen đến khả năng hòa tan phosphate của chủng *E. hormaechei* GC1.3, glucose trong công thức môi trường NBRIP được thay thế hoàn toàn bằng một trong bốn nguồn carbon gồm glucose, sucrose, mannitol và maltose, đồng thời nguồn nitrogen được thay thế bằng một trong ba nguồn gồm ammonium sulfate ((NH₄)₂SO₄), ammonium chloride (NH₄Cl) và sodium nitrate (NaNO₃). Thí nghiệm được bố trí hoàn toàn ngẫu nhiên theo kiểu hai nhân tố, bao gồm bốn nghiệm thức nguồn carbon và ba nghiệm thức nguồn nitrogen. Nồng độ của nguồn carbon và nguồn nitrogen được lựa chọn dựa trên các nghiệm thức tối ưu thu được từ các thí nghiệm tương ứng ở mục 2.2.2 và 2.2.3. Các thành phần khác của môi trường và điều kiện nuôi cấy được giữ không đổi theo mục 2.2.

2.3. Khảo sát các yếu tố môi trường ảnh hưởng đến khả năng hòa tan lân

2.3.1. Khả năng hòa tan hai dạng lân khó tan (FePO₄ và AlPO₄) với các nồng độ khác nhau

Dịch huyền phù vi khuẩn và môi trường nuôi cấy được chuẩn bị tương tự mục 2.2. Để đánh giá khả năng hòa tan các dạng phosphate khó tan khác nhau của chủng *E. hormaechei* GC1.3, Ca₃(PO₄)₂ trong môi trường NBRIP được thay thế hoàn toàn bằng nhôm phosphate (AlPO₄) hoặc sắt (III) phosphate (FePO₄). Mỗi nguồn phosphate được khảo sát ở năm nồng độ khác nhau (w/v), gồm 0; 0,15; 0,30; 0,45 và 0,60 g/L (Thy và ctv., 2021). Thí nghiệm được bố trí hoàn toàn ngẫu nhiên theo kiểu hai nhân tố, bao gồm hai nghiệm thức nguồn phosphate (AlPO₄ và FePO₄) và năm mức nồng độ phosphate. Các thí nghiệm được tiến hành trong môi trường lỏng với ba lần lặp lại. Sau 10 ngày nuôi cấy, pH môi trường và hàm lượng lân hòa tan được xác định nhằm đánh giá khả năng hòa tan hai dạng phosphate khó tan của chủng nghiên cứu.

2.3.2. Ảnh hưởng của nhiệt độ ủ và điều kiện nuôi lắc hoặc tĩnh đến khả năng hòa tan lân vô cơ

Dịch huyền phù vi khuẩn *E. hormaechei* GC1.3 và môi trường nuôi cấy được chuẩn bị tương tự mục 2.2. Để đánh giá ảnh hưởng của nhiệt độ và chế độ

nuôi cấy đến khả năng hòa tan phosphate của chủng nghiên cứu, các bình môi trường NBRIP sau khi cấy dịch vi khuẩn được ủ ở ba mức nhiệt độ khác nhau (25°C, 30°C và 35°C) kết hợp với hai chế độ nuôi cấy gồm nuôi tĩnh và nuôi lắc trên máy lắc với tốc độ 200 rpm. Thí nghiệm được bố trí hoàn toàn ngẫu nhiên theo kiểu hai nhân tố. Các nghiệm thức được nuôi cấy trong 10 ngày với ba lần lặp lại (Wang et al., 2022). Sau thời gian nuôi cấy, pH môi trường và hàm lượng lân hòa tan được xác định nhằm đánh giá điều kiện nuôi cấy thích hợp cho khả năng hòa tan phosphate của chủng *E. hormaechei* GC1.3.

2.4. Phân tích và xử lý số liệu

Các số liệu thu được được nhập liệu, xử lý và vẽ đồ thị bằng phần mềm Microsoft Excel. Việc phân tích thống kê được thực hiện bằng phần mềm Minitab v19. Kết quả được trình bày dưới dạng giá trị trung bình của ba lần lặp ± độ lệch chuẩn. Đối với các thí nghiệm bố trí một nhân tố, dữ liệu được phân tích bằng phương pháp phân tích phương sai một nhân tố (one-way ANOVA). Đối với các thí nghiệm bố trí hai nhân tố, dữ liệu được phân tích bằng phương pháp phân tích phương sai hai nhân tố (two-way ANOVA) nhằm đánh giá ảnh hưởng của từng nhân tố và tương tác giữa các nhân tố. Khi sự khác biệt có ý nghĩa thống kê, phép thử Tukey được sử dụng để so sánh trung bình giữa các nghiệm thức ở mức ý nghĩa $p < 0,05$.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

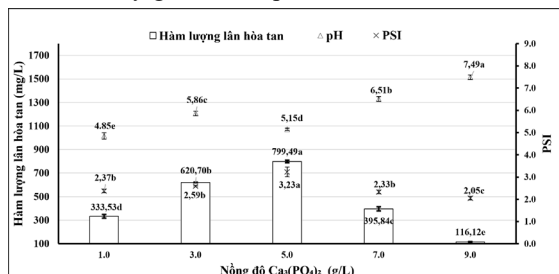
3.1. Ảnh hưởng nồng độ lân vô cơ Ca₃(PO₄)₂

Kết quả cho thấy nồng độ Ca₃(PO₄)₂ ảnh hưởng đáng kể đến hàm lượng lân hòa tan do chủng *E. hormaechei* GC1.3 tạo ra. Hàm lượng lân hòa tan tăng dần từ 333,53 mg/L ở nồng độ 1,0 g/L lên 799,49 mg/L ở 5,0 g/L, đồng thời chỉ số PSI cũng đạt giá trị cao nhất (3,23). Việc tăng nồng độ phosphate trong môi trường từ 1,0 đến 5,0 g/L làm gia tăng hàm lượng lân hòa tan do chủng vi khuẩn tạo ra. Tuy nhiên, khi nồng độ Ca₃(PO₄)₂ tiếp tục tăng lên 7,0 và 9,0 g/L, hàm lượng lân hòa tan giảm đáng kể xuống còn 395,84 và 116,12 mg/L, mặc dù lượng phosphate ban đầu trong môi trường cao hơn. Kết quả này cho thấy khả năng hòa tan lân của chủng GC1.3 không tăng tỷ lệ thuận với lượng Ca₃(PO₄)₂ bổ sung và đạt giá trị tối ưu tại nồng độ 5,0 g/L trong điều kiện thí nghiệm (Hình 1).

Bên cạnh đó, giá trị pH có sự biến động giữa các nghiệm thức và không hoàn toàn tương đồng với xu hướng thay đổi của hàm lượng lân hòa tan. Tại nồng độ 5,0 g/L, hàm lượng lân hòa tan đạt cao nhất trong khi pH chỉ ở mức 5,15; ngược lại, ở nồng độ 9,0 g/L,

pH tăng lên 7,49 nhưng hàm lượng lân hòa tan giảm xuống thấp nhất. Kết quả này cho thấy pH là một yếu tố có liên quan đến quá trình hòa tan lân; tuy nhiên, trong nghiên cứu này, chưa có đủ dữ liệu để khẳng định mối quan hệ trực tiếp giữa sự thay đổi pH và hiệu quả hòa tan lân của chủng GC1.3 (Hình 1). Nhìn chung, trong phạm vi khảo sát, nồng độ 5,0 g/L $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ được xác định là điều kiện thích hợp nhất để đánh giá khả năng hòa tan lân của *E. hormaechei* GC1.3, thể hiện đồng thời giá trị PSI và hàm lượng lân hòa tan cao nhất.

Theo Agboola et al. (2023) và Sanchez-Gonzalez et al. (2023), các chủng vi khuẩn hòa tan lân (PSB) thường đạt hoạt tính cao nhất trong khoảng nồng độ 2 - 5 g/L, nhưng hiệu quả giảm khi nồng độ tiếp tục tăng. Tương tự, Sharma et al. (2013) cho rằng khả năng phân giải lân của vi sinh vật tuân theo một quy luật điển hình: ở nồng độ phosphate thấp, sự thiếu hụt phosphate hạn chế quá trình hòa tan; ở mức trung bình, hiệu quả hòa tan lân tốt nhất; trong khi ở nồng độ cao, hiện tượng tái kết tủa phosphate cùng với ảnh hưởng bất lợi của ion Ca^{2+} làm suy giảm hiệu quả.



Hình 1. Ảnh hưởng nồng độ lân $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ đến PSI, pH và hàm lượng lân hòa tan

3.2. Ảnh hưởng các nguồn và nồng độ carbohydrate khác nhau

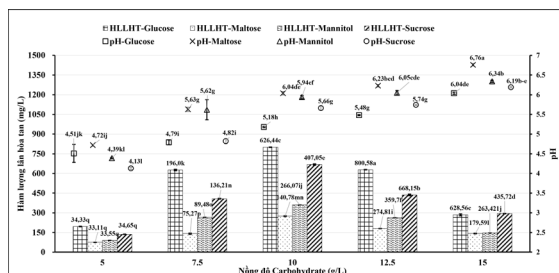
Kết quả cho thấy cả loại và nồng độ nguồn carbon đều ảnh hưởng đáng kể đến khả năng hòa tan lân của chủng *E. hormaechei* GC1.3. Trong số các nguồn carbon được khảo sát, glucose cho hiệu quả hòa tan lân cao nhất ở hầu hết các nồng độ. Hàm lượng lân hòa tan tăng từ 196,00 mg/L ở nồng độ 5 g/L lên cực đại 800,58 mg/L ở 10 g/L glucose, sau đó giảm xuống 628,56 mg/L và 284,74 mg/L tương ứng ở 12 và 15 g/L. Kết quả này cho thấy nồng độ 10 g/L glucose là điều kiện thích hợp nhất để đánh giá hoạt tính hòa tan lân của chủng GC1.3 trong nghiên cứu này (Hình 2). Đối với các nguồn carbon khác, hàm lượng lân hòa tan cũng tăng khi nồng độ carbon tăng từ 5 lên 10 g/L, sau đó giảm ở các nồng độ cao hơn. Ở nồng độ 10 g/L, sucrose cho hàm lượng lân hòa tan đạt 668,15 mg/L, cao hơn

mannitol (359,70 mg/L) và maltose (274,81 mg/L). Điều này cho thấy hiệu quả hòa tan lân của chủng GC1.3 phụ thuộc đáng kể vào loại nguồn carbon được sử dụng.

Giá trị pH của môi trường có xu hướng tăng theo nồng độ carbon đối với tất cả các nghiệm thức. Ở glucose, pH tăng từ 4,51 lên 6,04 khi nồng độ tăng từ 5 lên 15 g/L. Xu hướng tương tự cũng được ghi nhận ở maltose, mannitol và sucrose. Tuy nhiên, sự thay đổi pH không hoàn toàn tương ứng với sự thay đổi của hàm lượng lân hòa tan. Chẳng hạn, tại glucose 15 g/L, pH đạt giá trị cao nhất (6,04) nhưng hàm lượng lân hòa tan chỉ đạt 284,74 mg/L, thấp hơn đáng kể so với nghiệm thức glucose 10 g/L (800,58 mg/L). Kết quả này cho thấy trong phạm vi nghiên cứu, pH không phải là chỉ tiêu phản ánh trực tiếp hiệu quả hòa tan lân và cần được xem xét kết hợp với hàm lượng lân hòa tan.

Nhìn chung, kết quả cho thấy glucose là nguồn carbon thích hợp nhất cho hoạt động hòa tan lân của *E. hormaechei* GC1.3, trong đó nồng độ 10 g/L cho hiệu quả cao nhất. Sucrose cũng hỗ trợ khả năng hòa tan lân tương đối tốt, trong khi maltose và mannitol cho hiệu quả thấp hơn. Các kết quả này là cơ sở để lựa chọn nguồn carbon và nồng độ thích hợp cho các nghiên cứu tối ưu hóa môi trường nuôi cấy và phát triển chế phẩm vi sinh hòa tan lân từ chủng GC1.3.

Kết quả tương tự như trên được thể hiện qua nghiên cứu của Han et al. (2014) trên các chủng vi khuẩn chịu mặn có khả năng hòa tan lân cho thấy glucose tạo ra hàm lượng lân hòa tan cao nhất (đạt khoảng 618 mg/L), vượt trội so với các loại đường khác như fructose, maltose, sucrose hay mannitol. Một số nguồn carbon khác như xylose cũng cho hiệu quả nhất định nhưng vẫn kém hơn glucose. Những kết quả này củng cố nhận định rằng hiệu quả hòa tan lân phụ thuộc chặt chẽ vào khả năng chuyển hóa nhanh và sinh acid hữu cơ của vi khuẩn đối với từng loại cơ chất. Nghiên cứu của Hương và ctv. (2018) khi khảo sát các chủng vi khuẩn phân giải phosphate khó tan cũng cho thấy glucose là nguồn carbon phù hợp nhất đối với chủng *Pseudomonas aeruginosa* HD3. Tuy nhiên, nghiên cứu này cũng chỉ ra rằng không phải tất cả vi khuẩn đều có cùng xu hướng sử dụng cơ chất; ví dụ, một số chủng khác lại thích nghi tốt hơn với fructose. Điều này cho thấy tính đặc hiệu trong khả năng sử dụng nguồn carbon của từng chủng vi khuẩn, đồng thời nhấn mạnh vai trò quan trọng của việc lựa chọn cơ chất phù hợp nhằm tối ưu hóa hiệu quả hòa tan lân.



Hình 2. Ảnh hưởng các nguồn và nồng độ carbohydrate đến pH và hàm lượng lân hòa tan

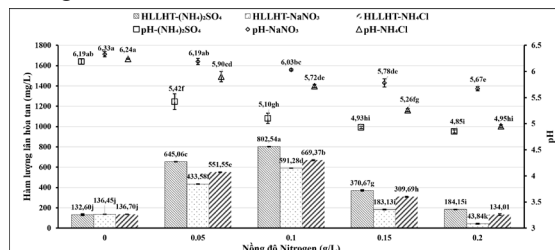
3.3. Ảnh hưởng các nguồn và nồng độ nitrogen khác nhau

Kết quả cho thấy nguồn và nồng độ nitrogen ảnh hưởng đáng kể đến pH và hàm lượng lân hòa tan của chủng *E. hormaechei* GC1.3. Đối với cả ba nguồn nitrogen khảo sát, hàm lượng lân hòa tan cao nhất được ghi nhận ở nghiệm thức 0,1 g/L $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ với 802,54 mg/L. Đối với NaNO_3 và NH_4Cl , hàm lượng lân hòa tan cao nhất lần lượt đạt 591,28 và 669,37 mg/L ở nồng độ 0,1 g/L, sau đó giảm rõ rệt khi tăng nồng độ nitrogen lên 0,15 và 0,2 g/L. Giá trị pH dao động từ 4,85 đến 6,33 và có xu hướng giảm khi hàm lượng lân hòa tan tăng. Tại nghiệm thức 0,1 g/L $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, pH đạt giá trị thấp nhất (5,10) đồng thời hàm lượng lân hòa tan cao nhất (802,54 mg/L). Ngược lại, các nghiệm thức đối chứng không bổ sung nitrogen có pH cao hơn (6,19 - 6,33) nhưng hàm lượng lân hòa tan chỉ dao động từ 132,60 đến 136,70 mg/L. Tuy nhiên, mối quan hệ này không hoàn toàn tuyến tính ở tất cả các nghiệm thức, do đó trong phạm vi nghiên cứu chỉ có thể ghi nhận sự thay đổi đồng thời giữa pH và khả năng hòa tan lân mà chưa đủ cơ sở để khẳng định cơ chế tác động cụ thể.

Nhìn chung, kết quả cho thấy nguồn nitrogen dạng amoni, đặc biệt là $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ở nồng độ 0,1 g/L, tạo điều kiện thuận lợi nhất cho hoạt động hòa tan lân của *E. hormaechei* GC1.3, thể hiện qua hàm lượng lân hòa tan đạt giá trị cao nhất trong các nghiệm thức khảo sát.

Kết quả nghiên cứu của Agboola et al. (2023) cho thấy nguồn nitrogen có ảnh hưởng rõ rệt đến khả năng hòa tan lân của chủng *Enterobacter*, trong đó các dạng nitrogen chứa NH_4^+ , đặc biệt là $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ cho hiệu quả cao hơn so với dạng nitrate. Ở nồng độ thích hợp $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ giúp gia tăng đáng kể hàm lượng lân hòa tan, đồng thời làm giảm pH môi trường. Kết quả này phù hợp với kết quả được báo cáo trong nghiên cứu tối ưu hóa hoạt tính hòa tan lân của *E. cloacae* và *E. hormaechei*, trong đó môi trường chứa ammonium sulphate ghi nhận khả năng hòa tan phosphate cao nhất. Habte and Osorio

(2012) cho rằng dạng nitrogen amoni có khả năng làm giảm pH mạnh hơn so với nitrate, từ đó thúc đẩy quá trình hòa tan phosphate. Tương tự, Han et al. (2012) cũng khẳng định ammonium sulfate là nguồn nitrogen tối ưu cho vi khuẩn hòa tan lân.



Hình 3. Ảnh hưởng của các nguồn và nồng độ nitrogen đến pH và hàm lượng lân hòa tan

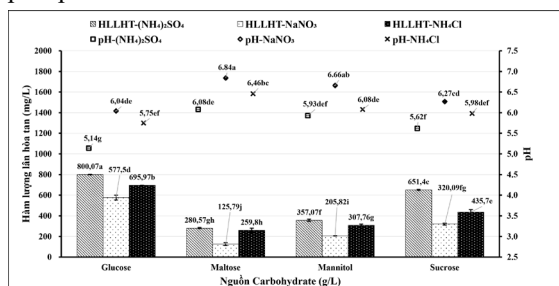
3.4. Ảnh hưởng của các nguồn C và N khác nhau

Kết quả ảnh hưởng của nguồn C và N được thể hiện qua Hình 4. Sự kết hợp giữa nguồn carbon và nguồn nitrogen có ảnh hưởng đáng kể đến khả năng hòa tan lân của chủng *E. hormaechei* GC1.3. Trong tất cả các tổ hợp khảo sát, nghiệm thức glucose kết hợp với $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ cho hiệu quả cao nhất, với hàm lượng lân hòa tan đạt 800,07 mg/L và pH đạt 5,14. Khi glucose được kết hợp với NH_4Cl và NaNO_3 , hàm lượng lân hòa tan giảm lần lượt còn 695,97 mg/L và 577,50 mg/L. Kết quả này cho thấy cùng một nguồn carbon nhưng hiệu quả hòa tan lân thay đổi tùy theo nguồn nitrogen được sử dụng. Đối với các nguồn carbon còn lại, xu hướng tương tự cũng được ghi nhận. Sucrose kết hợp với $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ đạt hàm lượng lân hòa tan 651,40 mg/L, cao hơn đáng kể so với NH_4Cl (435,70 mg/L) và NaNO_3 (320,09 mg/L). Tương tự, ở các nghiệm thức mannitol và maltose, tổ hợp với $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ luôn cho hàm lượng lân hòa tan cao hơn so với hai nguồn nitrogen còn lại. Trong khi đó, maltose là nguồn carbon cho hiệu quả thấp nhất, với hàm lượng lân hòa tan chỉ dao động từ 125,79 đến 280,57 mg/L tùy theo nguồn nitrogen.

Giá trị pH dao động trong khoảng 5,14 - 6,66. Nhìn chung, các nghiệm thức có hàm lượng lân hòa tan cao thường đi kèm với giá trị pH thấp hơn. Chẳng hạn, tổ hợp glucose + $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ cho hàm lượng lân hòa tan cao nhất (800,07 mg/L) và đồng thời có pH thấp nhất (5,14), trong khi các nghiệm thức sử dụng NaNO_3 thường có pH cao hơn (6,04 - 6,66) và hàm lượng lân hòa tan thấp hơn. Tổng thể, dữ liệu cho thấy glucose là nguồn carbon phù hợp nhất cho hoạt động hòa tan lân của chủng GC1.3, trong khi $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ là nguồn nitrogen cho hiệu quả cao nhất. Tổ hợp glucose và $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ được xác

định là điều kiện tối ưu trong nghiên cứu này, thể hiện qua hàm lượng lân hòa tan cao nhất trong tất cả các nghiệm thức khảo sát.

Nhiều nghiên cứu cho thấy glucose kết hợp với các dạng nitrogen chứa NH_4^+ là điều kiện tối ưu cho quá trình hòa tan lân. Cụ thể, Han et al. (2012) ghi nhận glucose tạo ra hàm lượng lân hòa tan cao nhất (khoảng 618 mg/L), vượt trội so với các nguồn carbon khác như fructose, maltose, sucrose hay mannitol; một số nguồn như xylose cũng có hiệu quả nhưng thấp hơn. Tương tự, Hương và ctv. (2018) cũng xác định glucose là nguồn carbon phù hợp nhất cho chủng *Pseudomonas aeruginosa* HD3 trong quá trình hòa tan phosphate. Bên cạnh đó, Agboola et al. (2023) cho rằng nguồn nitrogen ảnh hưởng rõ rệt đến hiệu quả hòa tan lân của các chủng *Enterobacter*, trong đó các dạng nitrogen chứa NH_4^+ đặc biệt là $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ cho hiệu quả cao hơn so với dạng nitrate. Kết quả này phù hợp với nhận định của Habte and Osorio (2012) cho rằng nitrogen dạng amoni có khả năng làm giảm pH môi trường mạnh hơn so với nitrate, từ đó thúc đẩy quá trình hòa tan phosphate.



Hình 4. Ảnh hưởng của các nguồn carbohydrate và nitrogen đến pH và hàm lượng lân hòa tan

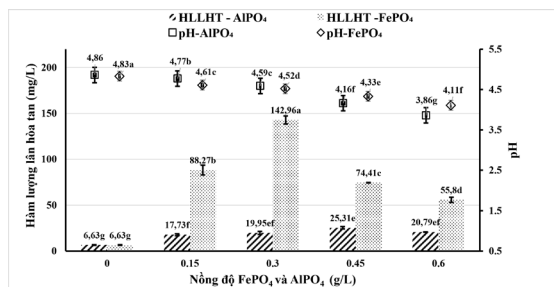
3.5. Ảnh hưởng của FePO_4 và AlPO_4 ở các nồng độ khác nhau

Kết quả được trình bày trong Hình 5 cho thấy cả dạng phosphate vô cơ và nồng độ phosphate đều ảnh hưởng đáng kể đến khả năng hòa tan lân của chủng *E. hormaechei* GC1.3, thể hiện qua hàm lượng lân hòa tan và sự thay đổi pH môi trường. Nhìn chung, hàm lượng lân hòa tan tăng khi nồng độ phosphate tăng từ mức thấp đến trung bình, sau đó giảm khi tiếp tục tăng nồng độ, cho thấy tồn tại một ngưỡng nồng độ thích hợp cho quá trình hòa tan lân. Đối với nguồn lân sắt (FePO_4), khả năng hòa tan lân của chủng GC1.3 cao hơn rõ rệt so với nguồn lân nhôm (AlPO_4) ở tất cả các nồng độ khảo sát. Hàm lượng lân hòa tan tăng từ 6,63 mg/L ở nghiệm thức đối chứng lên cực đại 142,96 mg/L tại nồng độ 0,30 g/L, sau đó giảm xuống còn 74,41 mg/L và 55,80 mg/L tương ứng ở các nồng độ 0,45 và 0,60 g/L. Song

song với sự gia tăng hàm lượng lân hòa tan, pH môi trường giảm từ 4,83 xuống 4,11, cho thấy quá trình acid hóa môi trường có thể đóng vai trò quan trọng trong cơ chế huy động phosphate từ FePO_4 .

Ngược lại, đối với nguồn lân nhôm (AlPO_4), hàm lượng lân hòa tan đạt thấp hơn đáng kể, dao động từ 17,73 đến 25,31 mg/L ở các nghiệm thức có bổ sung phosphate. Giá trị cao nhất được ghi nhận tại nồng độ 0,45 g/L với 25,31 mg/L, sau đó giảm nhẹ còn 20,79 mg/L ở nồng độ 0,60 g/L. Mặc dù pH môi trường cũng giảm từ 4,86 xuống 3,86 khi nồng độ AlPO_4 tăng nhưng lượng phosphate hòa tan vẫn thấp hơn nhiều so với FePO_4 . Điều này cho thấy sự giảm pH không phải là yếu tố duy nhất quyết định hiệu quả hòa tan phosphate, mà còn chịu ảnh hưởng bởi bản chất hóa học của từng dạng phosphate vô cơ và khả năng tương tác của vi khuẩn với các phức chất kim loại tương ứng. Sự suy giảm hàm lượng lân hòa tan ở các nồng độ phosphate cao hơn (0,45 - 0,60 g/L đối với FePO_4 và 0,60 g/L đối với AlPO_4) cho thấy việc gia tăng cơ chất vượt quá mức tối ưu không tiếp tục làm tăng hiệu quả hòa tan. Hiện tượng này có thể liên quan đến sự thay đổi cân bằng hóa học của hệ thống hoặc giới hạn về khả năng huy động phosphate của vi khuẩn trong điều kiện thí nghiệm.

Kết quả nghiên cứu phù hợp với báo cáo của Qingwei et al. (2023), trong đó hiệu quả hòa tan các dạng phosphate vô cơ thường được ghi nhận theo thứ tự $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 > \text{FePO}_4 > \text{AlPO}_4$. Tác giả cho rằng sự khác biệt này xuất phát từ độ bền liên kết giữa phosphate và các ion kim loại cũng như khả năng tạo phức của các acid hữu cơ được vi sinh vật tiết ra. Tương tự, Thy và ctv. (2021) cũng cho thấy khả năng hòa tan phosphate phụ thuộc mạnh vào dạng phosphate bổ sung và đặc điểm sinh lý của từng chủng vi sinh vật. Tuy nhiên, mức độ hòa tan giữa các dạng phosphate có thể khác nhau tùy thuộc vào loài vi sinh vật, điều kiện môi trường và cơ chế huy động phosphate đặc trưng của từng chủng.



Hình 5. Ảnh hưởng FePO_4 và AlPO_4 đến pH và hàm lượng lân hòa tan

Từ kết quả thu được có thể kết luận rằng chủng *E. hormaechei* GC1.3 có khả năng hòa tan FePO_4 hiệu quả hơn đáng kể so với AlPO_4 , với hàm lượng lân hòa tan cao nhất đạt 142,96 mg/L tại nồng độ 0,30 g/L. Kết quả nghiên cứu cho thấy *E. hormaechei* GC1.3 có khả năng hòa tan FePO_4 trong điều kiện phòng thí nghiệm, cho thấy tiềm năng huy động các nguồn phosphate khó tan và cung cấp cơ sở cho các nghiên cứu tiếp theo trong điều kiện đất và trên cây trồng.

3.6. Ảnh hưởng nhiệt độ ủ và điều kiện nuôi cấy đến pH và hàm lượng lân hòa tan

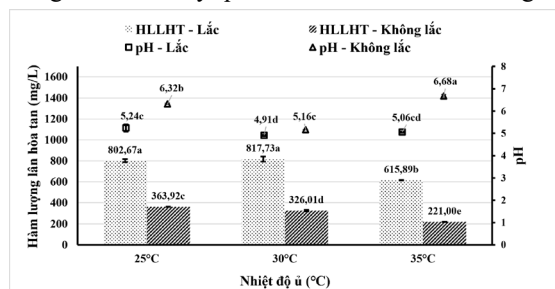
Kết quả được trình bày ở Hình 6 cho thấy nhiệt độ và điều kiện nuôi cấy ảnh hưởng đáng kể đến khả năng hòa tan lân của chủng *E. hormaechei* GC1.3. Ở cả ba mức nhiệt độ khảo sát, điều kiện nuôi cấy luôn cho hàm lượng lân hòa tan cao hơn so với nuôi không lắc. Tại 25°C, hàm lượng lân hòa tan đạt 802,67 mg/L trong điều kiện lắc, cao hơn khoảng 2,2 lần so với nghiệm thức không lắc (363,92 mg/L). Xu hướng tương tự cũng được ghi nhận ở 30°C và 35°C, với hàm lượng lân hòa tan lần lượt đạt 817,73 và 615,89 mg/L trong điều kiện lắc, trong khi chỉ đạt 326,01 và 221,00 mg/L ở điều kiện không lắc.

Trong điều kiện nuôi cấy, hàm lượng lân hòa tan đạt cao nhất tại 30°C (817,73 mg/L), tuy nhiên không khác biệt ý nghĩa thống kê so với 25°C (802,67 mg/L). Khi nhiệt độ tăng lên 35°C, hàm lượng lân hòa tan giảm còn 615,89 mg/L. Đối với điều kiện không lắc, xu hướng giảm theo nhiệt độ thể hiện rõ hơn, từ 363,92 mg/L ở 25°C xuống còn 221,00 mg/L ở 35°C. Kết quả này cho thấy khoảng nhiệt độ 25 - 30°C là điều kiện phù hợp nhất cho hoạt động hòa tan lân của chủng GC1.3 trong nghiên cứu này. Giá trị pH dao động từ 4,91 đến 6,68. Trong điều kiện nuôi cấy, pH đạt giá trị thấp hơn so với nghiệm thức không lắc ở cùng nhiệt độ. Cụ thể, tại 25°C và 30°C, pH ở nghiệm thức lắc lần lượt là 5,24 và 4,91, trong khi ở nghiệm thức không lắc đạt 6,32 và 5,16. Đồng thời, các nghiệm thức có hàm lượng lân hòa tan cao thường đi kèm với giá trị pH thấp hơn. Tuy nhiên, dữ liệu hiện có chỉ cho phép ghi nhận sự thay đổi đồng thời giữa pH và khả năng hòa tan lân, chưa đủ cơ sở để khẳng định mối quan hệ nhân quả hoặc cơ chế tác động cụ thể.

Kết quả cho thấy điều kiện nuôi cấy ở khoảng 25 - 30°C tạo điều kiện thuận lợi nhất cho hoạt động hòa tan lân của *E. hormaechei* GC1.3, thể hiện qua hàm lượng lân hòa tan cao hơn đáng kể so với điều kiện không lắc. Điều này cho thấy nhiệt độ và chế độ nuôi cấy là những yếu tố cần được xem xét khi

tối ưu hóa quá trình sản xuất chế phẩm vi sinh hòa tan lân từ chủng GC1.3.

Kết quả nghiên cứu của Mardad et al. (2014) cho thấy khả năng hòa tan phosphate của các chủng thuộc các chi *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Enterobacter* và *Acinetobacter* giảm đáng kể khi nhiệt độ tăng lên đến 45°C. Wang et al. (2022) cho rằng điều kiện nuôi cấy giúp gia tăng hiệu quả hòa tan phosphate nhờ tăng cường tiếp xúc giữa vi khuẩn và cơ chất, đồng thời thúc đẩy quá trình acid hóa môi trường.



Hình 6. Ảnh hưởng nhiệt độ ủ và điều kiện nuôi cấy đến pH và hàm lượng lân hòa tan

4. KẾT LUẬN

Kết quả nghiên cứu cho thấy khả năng hòa tan lân của *E. hormaechei* GC1.3 chịu ảnh hưởng bởi các yếu tố dinh dưỡng và điều kiện nuôi cấy, trong đó nguồn carbon, nguồn nitrogen, dạng phosphate khó tan, nhiệt độ và chế độ nuôi cấy là những yếu tố quan trọng cần được xem xét khi tối ưu hóa hoạt động của chủng vi khuẩn này. Nghiên cứu đã góp phần làm rõ đặc điểm sinh lý liên quan đến khả năng huy động lân của *E. hormaechei* GC1.3 được phân lập từ vùng rẫy lúa hoang, đồng thời cung cấp cơ sở khoa học cho việc lựa chọn điều kiện nuôi cấy phù hợp nhằm nâng cao hiệu quả hòa tan lân. Những kết quả thu được có thể dự đoán được tiềm năng ứng dụng của chủng GC1.3 trong phát triển các chế phẩm vi sinh hỗ trợ tăng cường khả năng sử dụng lân của cây trồng, góp phần giảm phụ thuộc vào phân bón hóa học và hướng tới nền nông nghiệp bền vững. Trong thời gian tới, việc đánh giá hiệu quả của chủng GC1.3 trên cây lúa trong điều kiện nhà lưới và đồng ruộng cần tiếp tục được thực hiện; đồng thời, khả năng tồn lưu, thích nghi và phát huy hoạt tính trong các điều kiện đất canh tác khác nhau cũng cần được nghiên cứu để làm cơ sở cho việc phát triển và ứng dụng thực tiễn. Tuy nhiên, cần có thêm những đánh giá về gen kháng kháng sinh, gen độc lực và mức độ an toàn sinh học trước khi ứng dụng ra ngoài thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Agboola, A. A., Ogunnusi, T. A., Dayo-Olagbende, O. G., & Akpor, O. B. (2023). Optimization of phosphate solubilization activity of *Enterobacter cloacae* and *Enterobacter hormaechei* from rhizosphere. *The Open Microbiology Journal*, 17. e187428582308080. <https://doi.org/10.2174/18742858-v17-230823-2023-8>.
- Akanmu, A. O., Olowe, O. M., Phiri, A. T., Nirere, D., Odebode, A. J., Umuhoza, N. J. K., Asemoloye, M. D. & Babalola, O.O. (2023). Bioresources in organic farming: Implications for sustainable agricultural systems. *Horticulturae*, 9(6), 659. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9060659>.
- Alemneh, A. A., Cawthray, G. R., Zhou, Y., Ryder, M. H., & Denton, M. D. (2025). A new isolation methodology for phosphate-solubilizing bacteria using a step-wise enrichment process. *Journal of Applied Microbiology*, 136(5), lxaf101. <https://doi.org/10.1093/jambio/lxaf101>.
- An, R., & Moe, L. A. (2016). Regulation of pyrroloquinoline quinone-dependent glucose dehydrogenase activity in the model rhizosphere dwelling bacterium *Pseudomonas putida* KT2440. *Applied and Environmental Microbiology*, 82(16), 4955-4964. <https://doi.org/10.1128/AEM.01211-16>.
- Anderson, H., Johengen, T., Miller, R. J., & Godwin, C. (2021). Accelerated sediment phosphorus release in Lake Erie's central basin during seasonal anoxia. *Limnology and Oceanography*, 67(2), 350-362. <https://doi.org/10.1002/lno.11900>.
- Bertani, G. (1951). Studies on lysogenesis. I. The mode of phage liberation by lysogenic *Escherichia coli*. *Journal of Bacteriology*, 62(3), 293-300. <https://doi.org/10.1128/jb.62.3.293-300.1951>
- Bharwad, K., & Rajkumar, S. (2020). Modulation of PQQ-dependent glucose dehydrogenase (mGDH and sGDH) activity by succinate in phosphate solubilizing plant growth promoting *Acinetobacter* sp. SK2. 3 *Biotech*, 10(1), 5. <https://doi.org/10.1007/s13205-019-1991-2>.
- Bi, Y., Xiao, L., & Liu, R. (2019). Response of AMF and PSB in coal mine soil remediation. *International Journal of Coal Science & Technology*, 6(4), 603-610. <https://doi.org/10.1007/s40789-019-00270-7>.
- Bilal, S., Hazafa, A., Ashraf, I., Alamri, S., Siddiqui, M. H., Ramzan, A., Qamar, N., Sher, F., & Naeem, M. (2021). Comparative effect of phosphorus-solubilizing bacteria and phosphorus fertilizer on mung bean yield. *Plants*, 10(10), 2079. <https://doi.org/10.3390/plants10102079>.
- Chouyia, F. E., Ventrino, V., & Pepe, O. (2022). Diversity, mechanisms and beneficial features of phosphate-solubilizing *Streptomyces* in sustainable agriculture: A review. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1035358. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1035358>.
- Elhaissofi, W., Ghoulam, C., Barakat, A., Zeroual, Y., & Bargaz, A. (2022). Phosphate bacterial solubilization and crop productivity. *Journal of Advanced Research*, 38, 13-28. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2021.08.014>.
- Habte, M., & Osorio, N. W. (2012). Effect of nitrogen form on the effectiveness of a phosphatesolubilizing fungus to dissolve rock phosphate. *Journal of Biofertilizers & Biopesticides*, 3(5), 127. <http://dx.doi.org/10.4172/2155-6202.1000127>.
- Han, Y., Wang, C., Li, X., Cao, X., Cao, A., & Zhao, N. (2014). Isolation and identification of saline tolerance phosphate-solubilizing bacteria derived from salt-affected soils and their mechanisms of P-solubilizing. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 293, 1259-1266. https://doi.org/10.1007/978-3-642-37922-2_135.
- Hương, N. T., Hà, T. T. T., & Giang, N. V. (2018). Phân lập, tuyển chọn vi khuẩn có khả năng phân giải phosphate khó tan từ đất vùng rẫy lúa ở tỉnh Hải Dương. *Tạp chí Khoa học Nông nghiệp Việt Nam*, 60(8), 18-22.
- Jain, C., Rodriguez-R, L. M., Phillippy, A. M., Konstantinidis, K. T., & Aluru, S. (2018). High throughput ANI analysis of 90K prokaryotic genomes reveals clear species boundaries. *Nature Communications*, 9, 5114. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07641-9>.
- John, A. G., Reshma, M. R., Beena, V. I., Santhosh, C. & Vijayan, M.S. (2024). Transformation of phosphorus fractions in various soil types of Kerala: An incubation study. *Journal of Scientific Research and Reports*, 30(7), 529-542. <https://doi.org/10.9734/jsrr/2024/v30i72167>.
- Lambers, H. (2022). Phosphorus acquisition and utilization in plants. *Annual Review of Plant Biology*, 73, 17-42. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-102720-125738>.
- Malusá, E., Sas-Paszt, L., & Ciesielska, J. (2012). Technologies for beneficial microorganisms inocula used as biofertilizers. *The Scientific World Journal*, 2012, 491206. <https://doi.org/10.1100/2012/491206>.
- Mardad, I., Serrano, A., & Soukri, A. (2014). Effect of carbon, nitrogen sources and abiotic stress on phosphate solubilization by bacterial strains isolated from a Moroccan rock phosphate

- deposit. *Journal of Advanced Chemical Engineering*, 4(1), 102.
<https://doi.org/10.4172/2090-4568.1000102>.
- Mendoza-Arroyo, G. E., Chan-Bacab, M. J., Aguila-Ramírez, R. N., Ortega-Morales, B. O., Canché Solís, R. E., Chab-Ruiz, A. O., Cob-Rivera, K. I., Dzib-Castillo, B., Tun-Che, R. E. & Camacho-Chab, J. C. (2020). Inorganic phosphate solubilization by a novel isolated bacterial strain *Enterobacter* sp. Itcb-09 and its application potential as biofertilizer. *Agriculture*, 10(9), 383.
<https://doi.org/10.3390/agriculture10090383>.
- Mosimann, C., Oberhansli, T., Ziegler, D., Nassal, D., Kandeler, E., Boller, T., Mäder, P., Thonar, C. (2017). Tracing *Pseudomonas* strains in maize rhizosphere. *Frontiers in Microbiology*, 7, 2150.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.02150>.
- Murphy, J., & Riley, J. P. (1962). A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta*, 27, 31-36.
[https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(00\)88444-5](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)88444-5).
- Nautiyal, C. S. (1999). An efficient microbiological growth medium for screening phosphate solubilizing microorganisms. *FEMS Microbiology Letters*, 170(1), 265-270.
[https://doi.org/10.1016/S0378-1097\(98\)00555-2](https://doi.org/10.1016/S0378-1097(98)00555-2).
- Nguyen, N., Rabiet, M., Grybos, M., & Deluchat, V. (2023). Does anoxia promote the mobilization of P-bearing colloids from dam reservoir sediment?. *Water Research*, 245, 120568.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120568>
- Pan, L., & Cai, B. (2023). Phosphate-solubilizing bacteria: Advances in their physiology, molecular mechanisms and microbial community effects. *Microorganisms*, 11(12), 2904.
<https://doi.org/10.3390/microorganisms11122904>.
- Pan, M., O'Flaherty, S., Hibberd, A., Gerdes, S., Morovic, W., & Barrangou, R. (2025). The curated *Lactobacillus acidophilus* NCFM genome provides insights into strain specificity and microevolution. *BMC Genomics*, 26(1), 11177. <https://doi.org/10.1186/s12864-024-11177-2>.
- Qingwei, Z., Lushi, T., Yu, Z., Yu, S., Wanting, W., Jiangchuan, W., Xiaolei, D., Xuejiao, H., & Bilal, M. (2023). Isolation and characterization of phosphate-solubilizing bacteria from rhizosphere of poplar on road verge and their antagonistic potential against various phytopathogens. *BMC Microbiology*, 23, 221.
<https://doi.org/10.1186/s12866-023-02953-3>.
- Raniro, H. R., Hernandez-Mora, A., Duboc, O., Staudinger, C., & Santner, J. (2025). Phosphorus release dynamics from cover crop residues: A comparison between single species and mixtures. *Soil Use and Management*, 41, e70082.
<https://doi.org/10.1111/sum.70082>.
- Rawal, N., Pande, K. R., Shrestha, R., & Vista, S. (2022). Phosphorus and potassium mineralization as affected by phosphorus levels and soil types under laboratory condition. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 5, e20229.
<https://doi.org/10.1002/agg2.20229>.
- Richardson, A. E., & Simpson, R. J. (2011). Soil microorganisms mediating phosphorus availability. *Plant Physiology*, 156(3), 989-996.
<https://doi.org/10.1104/pp.111.175448>.
- Sanchez-Gonzalez, M. E., Mora-Herrera, M. E., Wong-Villarreal, A., De La Portilla-López, N., Sanchez-Paz, L., Lugo, J., Vaca-Paulín, R., Del Aguila, P., & Yañez-Ocampo, G. (2023). Effect of pH and carbon source on phosphate solubilization by bacterial strains in Pikovskaya medium. *Microorganisms*, 11(1), 49.
<https://doi.org/10.3390/microorganisms11010049>.
- Santoro, V., Schiavon, M., & Celi, L. (2024). Role of soil abiotic processes on phosphorus availability and plant responses with a focus on strigolactones in tomato plants. *Plant Soil*, 494, 1-49.
<https://doi.org/10.1007/s11104-023-06266-2>.
- Sharma, S. B., Sayyed, R. Z., Trivedi, M. H. & Gobi, T. A. (2013). Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. *SpringerPlus*, 2, 587. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-587>
- Sokol, N. W., Slessarev, E., Marschmann, G. L., Nicolas, A., Blazewicz, S. J., Brodie, E. L., et al. (2022). Life and death in the soil microbiome. *Nature Reviews Microbiology*, 20(7), 415-430.
<https://doi.org/10.1038/s41579-022-00695-z>.
- Sokolova, E. A., Mishukova, O. V., Hlistun, I. V., Tromenschleger, I. N., Chumanova, E. V., & Voronina, E. N. (2024). Phenotypic and genomic analysis of *Enterobacter ludwigii* strains: insights into mechanisms enhancing plant growth both under normal conditions and in response to supplementation with mineral fertilizers and exposure to stress factors. *Plants*, 13(24), 3551.
<https://doi.org/10.3390/plants13243551>.
- Sokolova, E. A., Khlistun, I. V., Mishukova, O. V., Tromenschleger, I. N., Chumanova, E. V., & Voronina, E. N. (2025). Strain-specific phosphate mobilization in *Enterobacter*: Organic acid production and genomic architecture of solubilization mechanisms. *International Journal of Molecular Sciences*, 27(1), 322.
<https://doi.org/10.3390/ijms27010322>.
- Tang, Y., Wang, L., Fu, J., Zhou, F., Wei, H., Wu, X., Fan, S., Zhang, X. (2025). Unraveling the microecological mechanisms of phosphate-

- solubilizing *Pseudomonas asiatica* JP233 through metagenomics. *Frontiers in Microbiology*, 16, 1538117. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1538117>.
- Thy, C. T. A., Nhung, Đ. T. Y., & Nghĩa, N. K. (2021). Khả năng hòa tan lân và đối kháng với nấm *Fusarium solani* của dòng nấm *Aspergillus niger* H4.7 ở điều kiện phòng thí nghiệm. *Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ*, 57(5), 148-161. <https://doi.org/10.22144/ctu.jvn.2021.152>.
- Wang, Z., Zhang, H., Liu, L., Li, S., Xie, J., Xue, X., & Jiang, Y. (2022). Screening of phosphate-solubilizing bacteria and their abilities of phosphorus solubilization and wheat growth promotion. *BMC Microbiology*, 22, 296. <https://doi.org/10.1186/s12866-022-02715-7>.
- Wang, T., Xu, J., Chen, J., Liu, P., Hou, X., Yang, L., & Zhang, L. (2024). Progress in microbial fertilizer regulation of crop growth and soil remediation research. *Plants*, 13(3), 346. <https://doi.org/10.3390/plants13030346>.
- Wendimu, A., Yoseph, T., & Ayalew, T. (2023). Ditching phosphatic fertilizers for phosphate-solubilizing biofertilizers: A step towards sustainable agriculture and environmental health. *Sustainability*, 15(2), 1713. <https://doi.org/10.3390/su15021713>.