Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ
Số chuyên đề: Khoa học tự nhiên Đồng bằng sông Cửu Long
ISSN 1859-2333 | e-ISSN 2815-5599

DOI:10.22144/ctujos.2026.183

HOẠT TÍNH KHÁNG NẤM CỦA CÁC CHỦNG *Bacillus* PHÂN LẬP TỪ VÙNG RỄ ĐẬU NÀNH (*Glycine max* (L.) MERRILL) VỚI *Aspergillus flavus*, *Aspergillus tubingensis* VÀ *Fusarium falciforme*

Nguyễn Thị Liên*, Huỳnh Phương Thuỳ Linh, Trương Lê Trung Nhân và Nguyễn Tăng Phú
Viện Công nghệ Sinh học và Thực phẩm, Đại học Cần Thơ, Việt Nam
**Tác giả liên hệ (Corresponding author): ntlien@ctu.edu.vn*

Thông tin chung (Article Information)

Nhận bài (Received): 23/04/2026
Sửa bài (Revised): 19/05/2026
Duyệt đăng (Accepted): 16/08/2026

Title: *Antifungal activity of soybean (Glycine max (L.) MERRILL) rhizosphere Bacillus strains against Aspergillus flavus, Aspergillus tubingensis, and Fusarium falciforme*

Author(s): *Nguyen Thi Lien*, Huynh Phuong Thuy Linh, Truong Le Trung Nhan and Nguyen Tang Phu*

Affiliation(s): *Institute of Food and Biotechnology, Can Tho University, Viet Nam*

TÓM TẮT

Năng suất và chất lượng hạt đậu nành (Glycine max L.) thường bị suy giảm do sự tấn công của các nấm bệnh. Nghiên cứu này được thực hiện nhằm đánh giá hoạt tính kháng nấm của bốn chủng vi khuẩn Bacillus velezensis AG8.2, Bacillus thuringiensis AG9.2, Bacillus siamensis AG11.2 và Bacillus subtilis AG16.2 đối với Aspergillus tubingensis, Aspergillus flavus và Fusarium falciforme. Trong thử nghiệm đồng nuôi cấy, tỷ lệ ức chế sự phát triển sợi nấm dao động lần lượt từ 6,15 đến 54,3% đối với A. tubingensis, từ 0 đến 34,2% đối với A. flavus và từ 21,2 đến 51,8% đối với F. falciforme. Dịch nổi vô bào của các chủng khảo sát có khả năng ức chế cả sự phát triển sợi nấm và sự nảy mầm bào tử, đặc biệt trên giai đoạn nảy mầm của bào tử. Bên cạnh đó, các hợp chất hữu cơ dễ bay hơi cũng thể hiện hoạt tính kháng nấm đáng kể, với hiệu quả cao hơn trên F. falciforme. Các chủng Bacillus thử nghiệm cho thấy tiềm năng phát triển chế phẩm sinh học nhằm quản lý bền vững các bệnh hại trên cây đậu nành.

Từ khóa: *Dịch nổi vô bào, đậu nành, hoạt tính kháng nấm, hợp chất hữu cơ dễ bay hơi, kiểm soát sinh học*

ABSTRACT

Soybean (Glycine max L.) seed yield and quality are frequently reduced by fungal diseases. This study evaluated the antifungal activity of four bacterial strains, Bacillus velezensis AG8.2, Bacillus thuringiensis AG9.2, Bacillus siamensis AG11.2, and Bacillus subtilis AG16.2, against Aspergillus tubingensis, Aspergillus flavus, and Fusarium falciforme. In dual-culture assays, mycelial growth inhibition ranged from 6.15 to 54.3% for A. tubingensis, from 0 to 34.2% for A. flavus, and from 21.2 to 51.8% for F. falciforme. Cell-free supernatants of the tested strains inhibited both mycelial growth and spore germination, with stronger effects observed during the spore germination stage. In addition, volatile organic compounds produced by the bacterial strains exhibited considerable antifungal activity, with greater efficacy against F. falciforme than against the two Aspergillus species. These findings demonstrate the potential of the tested Bacillus strains for development as biocontrol agents for sustainable management of soybean fungal diseases.

Keywords: *Antifungal activity, biocontrol, cell-free supernatant, soybean, volatile organic compounds*

1. GIỚI THIỆU

Đậu nành (*Glycine max* (L.) Merrill) là một trong những cây trồng họ Đậu có giá trị kinh tế quan trọng trên toàn cầu, với diện tích canh tác đạt 143.175.353,0 ha và sản lượng 397.671.688,6 tấn trong năm 2024 (FAO, 2026). Nhờ hàm lượng protein và dầu cao, đậu nành đóng vai trò thiết yếu trong dinh dưỡng con người và thức ăn chăn nuôi (Pagano & Miransari, 2016). Tuy nhiên, việc sản xuất đậu nành đối mặt với nhiều thách thức từ các tác nhân gây bệnh, trong đó các loài thuộc chi *Fusarium* và *Aspergillus* gây hại nghiêm trọng trong quá trình canh tác và bảo quản sau thu hoạch (Olszak-Przybyś et al., 2026). Không chỉ làm giảm năng suất, các mầm bệnh này còn sinh tổng hợp nhiều loại độc tố gây mất an toàn thực phẩm và ảnh hưởng xấu đến sức khỏe con người (Li et al., 2025). Hiện nay, các biện pháp phòng trừ phổ biến bao gồm sử dụng thuốc hóa học (Zhang et al., 2024a) và gieo trồng giống kháng bệnh (Wu et al., 2024). Tuy nhiên, nguồn giống kháng còn hạn chế, trong khi quần thể mầm bệnh có tính biến động cao và phức tạp theo vùng sinh thái, làm giảm hiệu quả của chiến lược này (Hafez et al., 2021; Liu et al., 2023; Wu et al., 2024).

Mặc dù thuốc hóa học mang lại hiệu quả nhanh và rõ rệt trong kiểm soát bệnh hại, việc sử dụng không hợp lý có thể gây ô nhiễm môi trường nghiêm trọng (Tudi et al., 2021). Trong bối cảnh đó, việc ứng dụng vi khuẩn vùng rễ hoặc các hợp chất chuyển hóa của chúng đang được xem là hướng tiếp cận bền vững nhằm giảm phụ thuộc vào thuốc bảo vệ thực vật hóa học (Etesami et al., 2023). Trong số các vi sinh vật đối kháng, các loài thuộc chi *Bacillus* được xem là nhóm tác nhân kiểm soát sinh học triển vọng nhờ khả năng thích nghi tốt với điều kiện bất lợi, hình thành nội bào tử giúp tăng tính ổn định trong bảo quản và sinh tổng hợp đa dạng hợp chất có hoạt tính sinh học như lipopeptide, peptide kháng sinh, enzyme ngoại bào và các hợp chất hữu cơ dễ bay hơi (Shafi et al., 2017).

Kết quả của những nghiên cứu trên đã cho thấy việc đánh giá đồng thời về khả năng ức chế các nấm bệnh gây hại cho đậu nành của tế bào vi khuẩn sống, dịch nổi vô bào và các hợp chất hữu cơ dễ bay hơi từ *Bacillus* vẫn còn hạn chế tại Việt Nam. Do đó, nghiên cứu này được thực hiện nhằm đánh giá hoạt tính đối kháng của các chủng *Bacillus* phân lập từ vùng rễ đậu nành đối với *Aspergillus flavus*, *A. tubingensis* và *Fusarium falciforme*. Đồng thời, vai trò của dịch nổi vô bào và các hợp chất hữu cơ dễ bay hơi trong cơ chế kháng nấm của các chủng vi khuẩn thử nghiệm cũng đã được xem xét. Kết quả thu được sẽ cung cấp cơ sở khoa học cho việc phát triển chế phẩm sinh học phục vụ quản lý tổng hợp bệnh hại trên cây đậu nành.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Vật liệu

Các chủng nấm gây bệnh trên đậu nành *A. flavus* EAY (GenBank accession number: PZ312959), *A. tubingensis* EAB (GenBank accession number: PZ317595), *F. falciforme* FN2 (GenBank accession number: PQ394754).

Các chủng vi khuẩn vùng rễ đậu nành: *Bacillus velezensis* AG8.2 (GenBank accession number: PZ312952), *B. thuringiensis* AG9.2 (GenBank accession number: PZ312951), *B. siamensis* AG11.2 (GenBank accession number: PZ312956) và *B. subtilis* AG16.2 (GenBank accession number: PZ312957).

2.2. Khảo sát hoạt tính kháng nấm của các chủng *Bacillus* thử nghiệm

Các chủng vi khuẩn thử nghiệm được cấy trên các đĩa Petri chứa môi trường Luria Bertani (LB) agar trong 24 giờ. Sau đó, sinh khối vi khuẩn được thu nhận và hòa tan với dung dịch 0,85% NaCl vô trùng và trộn đều. Các mẫu dịch huyền phù được đo độ truyền quang ở bước sóng 600 nm (OD_{600}) và điều chỉnh về OD_{600} bằng 0,1 (tương đương độ đục chuẩn 0,5 McFarland với mật số đạt 10^8 tế bào/mL).

Một khối thạch nấm với đường kính khoảng 6 mm cắt ở phần rìa của khuẩn lạc nấm được nuôi cấy trước 5 ngày và đặt vào tâm đĩa Petri chứa sẵn môi trường malt extract agar (MEA). Huyền phù vi khuẩn thử nghiệm (3 µL) được nhỏ ở 3 điểm đối xứng qua tâm và 1 giếng được bơm nước cất vô trùng dùng làm đối chứng. Mỗi chủng vi khuẩn được bố trí lặp lại 3 lần. Sau 5 ngày ủ ở nhiệt độ phòng, bán kính vùng sợi nấm phát triển lan rộng được đo bằng thước kẹp điện tử. Tỷ lệ ức chế sự phát triển của các chủng nấm bởi vi khuẩn được tính theo mô tả của Han et al. (2015):

$$I = \frac{(R_{ĐC}-R_{VK})\times 100}{R_{ĐC}} \quad (1)$$

Trong đó: I là tỷ lệ ức chế nấm bệnh bởi vi khuẩn thử nghiệm, $R_{ĐC}$ là bán kính hệ sợi nấm ở phía đối chứng, R_{VK} là bán kính vùng sợi nấm ở phía có vi khuẩn.

2.3. Khảo sát hoạt tính kháng nấm của dịch nổi vô bào (cell-free supernatant – CFS) thu nhận từ các chủng *Bacillus*

Huyền phù mỗi chủng vi khuẩn thử nghiệm với OD_{600} = 0,1 (200 µL) được thêm vào 20 mL môi trường LB lỏng và ủ lắc ở 30°C trong 48 giờ. Dịch vi khuẩn được tiến hành ly tâm ở 4°C với tốc độ 10.000 vòng/phút trong 10 phút. Phần dịch ly tâm được thu nhận và lọc qua màng với đường kính lỗ lọc 0,22 µm. Dịch lọc được thêm vào môi trường MEA ở 50°C để nồng độ dịch lọc đạt 20% (v/v) và lắc đều, sau đó phân phối ra các đĩa Petri. Nghiệm thức đối chứng được thực hiện tương tự nhưng thay thế dịch lọc bằng môi trường LB. Mỗi nghiệm thức được lặp lại 3 lần tương ứng 3 đĩa.

Trong thử nghiệm ức chế sự phát triển của sợi nấm, các khối thạch của mỗi loài nấm thử nghiệm (6 mm) được đặt vào trung tâm các đĩa Petri chứa môi trường bổ sung CFS và đối chứng.

Trong thử nghiệm ức chế sự nảy mầm của bào tử, 50 µL huyền phù bào tử nấm (10^5 bào tử/mL) được trải đều trên các đĩa Petri chứa môi trường bổ sung CFS và đối chứng.

Các đĩa được ủ ở nhiệt độ phòng trong 2 ngày đối với thử nghiệm ức chế bào tử và 5 ngày đối với thử nghiệm ức chế sợi nấm (Liên và ctv., 2023). Sau khi ủ, hoạt tính kháng nấm của dịch nổi vô bào từ các chủng vi khuẩn được tính theo công thức:

$$\text{Tỷ lệ ức chế sự phát triển sợi nấm (\%)} = (D_{ĐC} - D_{CFS}) \times 100/D_{ĐC} \quad (2)$$

$$\text{Tỷ lệ ức chế sự nảy mầm của bào tử (\%)} = (N_{ĐC} - N_{CFS}) \times 100/N_{ĐC} \quad (3)$$

Trong đó:

$D_{ĐC}$ và D_{CFS} lần lượt là đường kính khuẩn lạc nấm ở nghiệm thức đối chứng và nghiệm thức có CFS,

$N_{ĐC}$ và N_{CFS} lần lượt là số lượng khuẩn lạc nấm ở nghiệm thức đối chứng và nghiệm thức có CFS.

2.4. Khảo sát hoạt tính kháng nấm của các hợp chất hữu cơ dễ bay hơi (volatile organic compounds – VOC) từ các chủng *Bacillus*

Huyền phù vi khuẩn ở mức OD_{600} = 0,1 (100 µL) được trải đều bằng tăm bông vô trùng trên các đĩa LB agar. Huyền phù bào tử nấm (50 µL) với mật số 10^5 bào tử/mL được trải trên các đĩa chứa môi trường MEA. Sau đó, phần đáy đĩa Petri đã chủng với nấm bệnh được đậy lên phần đáy đĩa đã trải vi khuẩn đối kháng, quấn thật kín bằng parafilm và giữ ở nhiệt độ phòng. Phần đáy đĩa Petri chứa môi trường LB agar không chủng vi khuẩn được sử dụng làm đối chứng. Mỗi nghiệm thức được lặp lại 3 lần tương ứng 3 đĩa cho mỗi chủng vi khuẩn hoặc nấm.

Thử nghiệm ức chế sợi nấm được thực hiện tương tự như thí nghiệm ức chế bào tử nấm bệnh. Tuy nhiên, một khối thạch có đường kính 6 mm được lấy từ phần rìa của khuẩn lạc nấm được cấy vào trung tâm của đĩa môi trường MEA thay cho huyền phù bào tử nấm. Các đĩa được ủ ở nhiệt độ phòng trong 2 ngày đối với thử nghiệm ức chế bào tử và 5 ngày đối với thử nghiệm ức chế sợi nấm (Liên và ctv., 2023). Hoạt tính kháng nấm của VOC được tính theo công thức (2) và (3) đã mô tả bên trên.

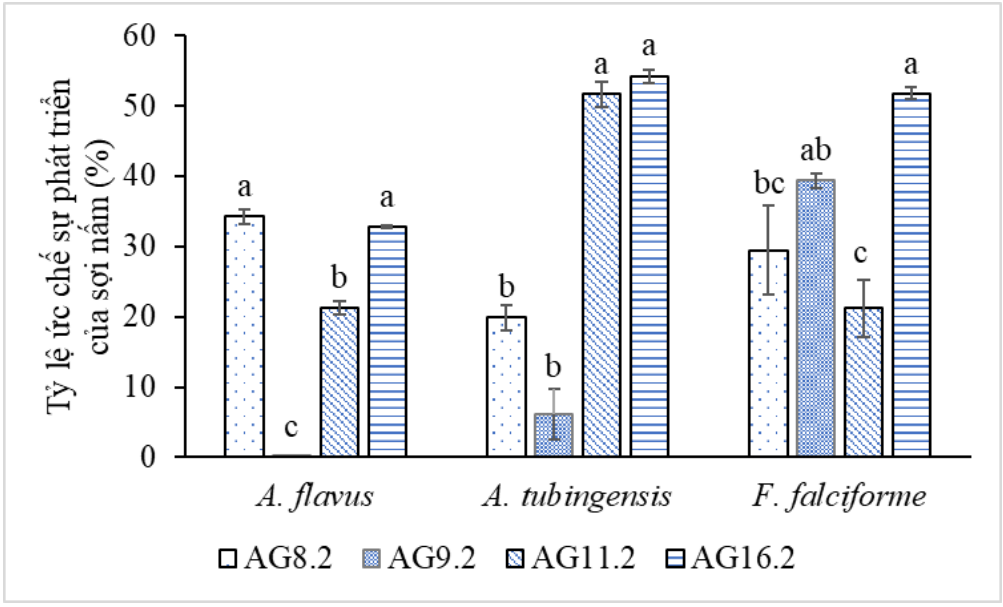
2.5. Xử lý số liệu

Số liệu thu thập được nhập và xử lý với Microsoft Excel 2016. Số liệu được xử lý bằng phương pháp phân tích phương sai một nhân tố (One-way ANOVA) và so sánh trung bình bằng phép kiểm định Fisher's LSD ở mức ý nghĩa 5% bằng phần mềm Minitab 16.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Hoạt tính kháng nấm của các chủng vi khuẩn *Bacillus* vùng rễ đậu nành

Ba trên bốn chủng vi khuẩn thử nghiệm cho thấy khả năng ức chế sự lan rộng của sợi nấm *A. tubingensis*, *A. flavus*, *F. falciforme*, ngoại trừ chủng *B. thuringiensis* AG9.2 không có khả năng ức chế *A. flavus*. Tỷ lệ ức chế sự phát triển của sợi nấm bởi các chủng vi khuẩn dao động lần lượt là 6,15 - 54,3%, 0 - 34,2%, 21,2 - 51,8% tương ứng với *A. tubingensis*, *A. flavus* và *F. falciforme*. Chủng vi khuẩn *B. subtilis* AG16.2 có khả năng ức chế mạnh cả 3 loại nấm thử nghiệm. Kết quả chi tiết được thể hiện ở Hình 1.



Hình 1. Tỷ lệ ức chế sự phát triển của *A. flavus*, *A. tubingensis* và *F. falciforme* bởi 4 chủng vi khuẩn *Bacillus*

Ghi chú: Kết quả trình bày là trung bình của ba lần lặp lại. Kết quả được trình bày dưới dạng trung bình±sai số chuẩn. Trong cùng một cụm, các cột có chữ cái theo sau giống nhau thể hiện sự khác biệt không có ý nghĩa thống kê theo phương pháp One-way ANOVA và phép kiểm định Fisher's LSD ở mức ý nghĩa 5%.

Kết quả trên phù hợp với nhiều nghiên cứu trước đây về khả năng kiểm soát sinh học của vi khuẩn vùng rễ, đặc biệt là chi *Bacillus*. Sun et al. (2023) ghi nhận *B. velezensis* BVE7 phân lập từ vùng rễ đậu nành có khả năng đối kháng với nhiều nấm gây bệnh như *Diaporthe longicolla*, *F. solani*, *F. tricinctum* và *F. verticillioides*. Đối với *A. flavus*, *B. siamensis* 3BS12-4 và *B. subtilis* E11 được báo cáo có khả năng ức chế lần lượt 43,1% và 64,3% (Aphaiso et al., 2024; Yuan et al., 2023), cao hơn mức ghi nhận trong nghiên cứu hiện tại (0 – 34,2%). Đối với nhóm *Fusarium*, *B. cereus* KB-6 cho hiệu quả ức chế *F. incarnatum* HKFi và *F. oxysporum* HKFo lần lượt đạt 42,39% và 47,93% (Zhu et al., 2025), tương đồng với mức ức chế 21,2 – 51,8% đối với *F. falciforme* trong nghiên cứu này. Kết quả nghiên cứu này một lần nữa cho thấy tiềm năng của vi sinh vật vùng rễ cây trồng trong phòng trừ sự tấn công của nấm bệnh. Hoạt tính kháng nấm của các chủng vi khuẩn có sự khác biệt theo từng nguồn gốc phân lập, mầm bệnh thử nghiệm. Các chủng vi khuẩn *Bacillus* thử nghiệm có khả năng ức chế đồng thời nhiều nấm bệnh gây hại đậu nành, cho thấy tính tiềm năng trong phòng trừ dịch hại tổng hợp.

Cơ chế kháng nấm tiềm năng của các chủng *Bacillus* có thể liên quan đến cả tác động trực tiếp và gián tiếp lên mầm bệnh. Kết quả nhiều nghiên cứu cho thấy *Bacillus* có khả năng tiết enzyme thủy phân như chitinase, β-1,3-glucanase, cellulase và protease nhằm phân giải thành tế bào nấm, đồng thời sản sinh siderophore giúp cạnh tranh sắt trong vùng rễ, từ đó hạn chế sinh trưởng của nấm bệnh (Gowtham et al., 2016; Han et al., 2021a; Agha et al., 2023). Ngoài ra, các chất chuyển hóa thứ cấp như lipopeptide (iturin, fengycin, surfactin) cũng có thể gây mất tính ổn định của màng tế bào nấm và ức chế sự kéo dài sợi nấm (Han et al., 2021b). Đồng thời, dưới tác động của *Bacillus*, sự biểu hiện của các gen liên quan đến phát triển sợi nấm, trao đổi chất và độc lực của nấm có thể bị suy giảm, từ đó làm giảm khả năng gây bệnh (Han et al., 2021a, 2021b).

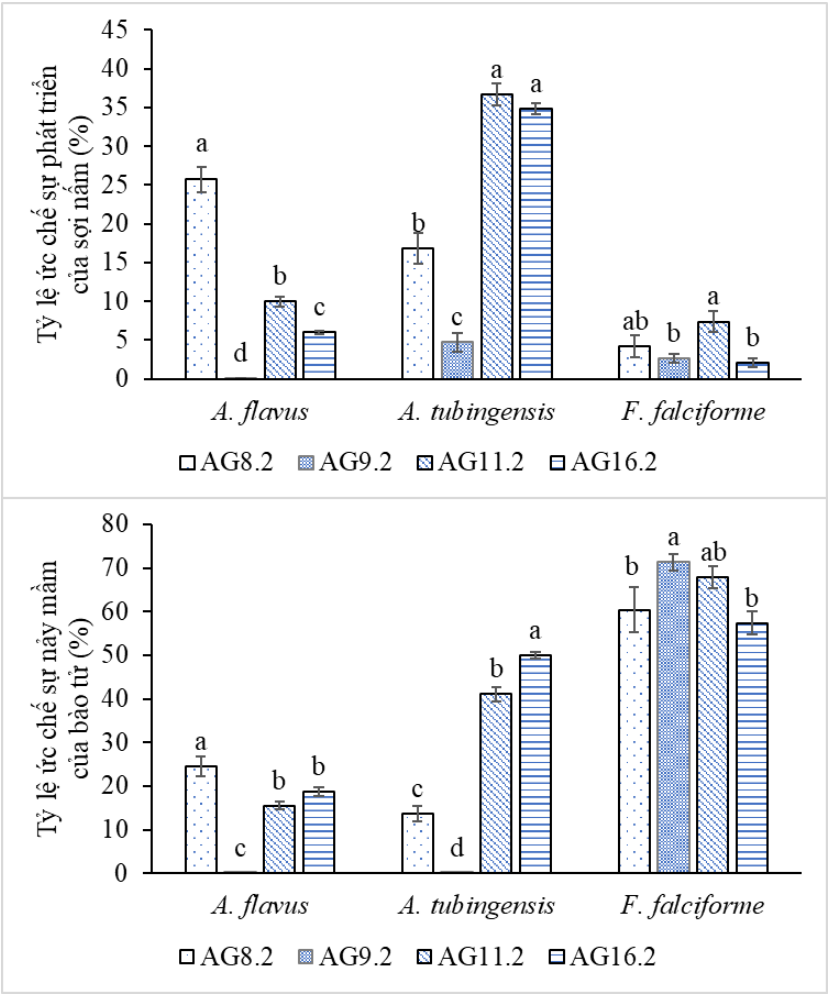
Khả năng ức chế đồng thời nhiều loài nấm gây hại cho thấy các chủng khảo nghiệm có giá trị ứng dụng trong quản lý dịch hại tổng hợp và phát triển nông nghiệp bền vững. Tuy nhiên, việc xác định cơ chế đối kháng và đánh giá hiệu quả của các chủng triển vọng trong điều kiện nhà lưới cần được thực hiện ở các nghiên cứu khác trong tương lai nhằm hoàn thiện cơ sở khoa học cho phát triển chế phẩm sinh học thương mại.

3.2. Hoạt tính kháng nấm của dịch nổi vô bào thu nhận từ các chủng *Bacillus*

Kết quả cho thấy CFS của các chủng vi khuẩn khảo sát đều có khả năng ức chế sự phát triển sợi

nấm ở các mức độ khác nhau. Trong đó, tỷ lệ ức chế sự phát triển sợi nấm *A. tubingensis* dao động trong khoảng 4,74 - 36,7%. CFS thu nhận từ *B. siamensis* AG11.2 và *B. subtilis* AG16.2 thể hiện hoạt tính ức chế sợi nấm *A. tubingensis* hiệu quả nhất ($p < 0,05$). Đối với *A. flavus*, CFS thu nhận từ chủng *B. velezensis* AG8.2 cho hiệu quả ức chế tốt nhất (25,8%), cao hơn rõ rệt so với các chủng còn lại. Riêng *F. falciforme* có mức độ nhạy cảm thấp hơn với CFS từ các chủng *Bacillus* thử nghiệm, tỷ lệ ức chế sợi nấm dao động trong khoảng 2,11 - 7,41%. Hiệu quả ức chế thấp này có thể liên quan đến nồng độ hoặc thành phần các hợp chất kháng nấm hiện diện trong CFS chưa đủ để ức chế mạnh sự phát triển sợi nấm *F. falciforme*. Các kết quả trên cho thấy hoạt tính ức chế sợi nấm của CFS phụ thuộc vào cả chủng vi khuẩn và loài nấm kiểm định.

Dịch nổi vô bào thu nhận từ các chủng khảo sát thể hiện khả năng ức chế quá trình nảy mầm bào tử tương đối mạnh, đặc biệt trên *F. falciforme*. CFS từ chủng AG9.2 cho hiệu quả cao nhất với tỷ lệ ức chế đạt 71,31%, theo sau là AG11.2 (67,93%), khác biệt không có ý nghĩa thống kê so với nhau. Đối với *A. tubingensis*, CFS của 3/4 chủng *Bacillus* thử nghiệm có hoạt tính kháng nấm với tỷ lệ ức chế sự nảy mầm bào tử dao động trong khoảng 13,7 - 49,9%. Với *A. flavus*, tỷ lệ ức chế sự nảy mầm của bào tử bởi CFS dao động trong khoảng 15,5 - 24,5%, với CFS của chủng AG8.2 có khả năng ức chế mạnh nhất (24,5%).



Hình 2. Tỷ lệ ức chế sợi nấm và bào tử của 3 loài nấm thử nghiệm bởi dịch nổi vô bào từ 4 chủng vi khuẩn *Bacillus*

Ghi chú: Kết quả trình bày là trung bình của ba lần lặp lại. Kết quả được trình bày dưới dạng trung bình±sai số chuẩn. Trong cùng một cụm, các cột có chữ cái theo sau giống nhau thể hiện sự khác biệt không có ý nghĩa thống kê theo phương pháp One-way ANOVA và phép kiểm định Fisher's LSD ở mức ý nghĩa 5%.

Kết quả này phù hợp với nhiều công bố trước đây về tiềm năng kiểm soát sinh học của CFS từ vi khuẩn đối kháng. CFS từ các chủng *Bacillus* đã được ghi nhận có khả năng ức chế mạnh sự phát triển sợi nấm, sự hình thành và nảy mầm bào tử của nhiều loài *Fusarium* và *Aspergillus* (Sun et al., 2023; Hirozawa et al., 2024; Aphaiso et al., 2024). Ngoài ra, kết quả nghiên cứu gần đây của Moreira et al. (2025) cũng cho thấy CFS từ *Bacillus* chứa nhiều hợp chất chuyển hóa thứ cấp như fengycin, surfactin và terpene, góp phần quan trọng trong hoạt tính kháng nấm. Những kết quả này cho thấy CFS từ vi khuẩn đối kháng có tiềm năng được khai thác như một dạng "postbiotic" trong quản lý bệnh hại cây trồng.

Về cơ chế tác động, CFS từ vi khuẩn đối kháng có thể chứa hỗn hợp đa dạng các hợp chất hoạt tính sinh học như enzyme thủy phân, lipopeptide, polyketide, acid hữu cơ và các chất chuyển hóa phân tử lượng thấp (Guevara-Avendaño et al., 2020; Hirozawa et al., 2024; Trinh et al., 2024; Aphaiso et al., 2024). Các hợp chất này có thể gây biến dạng sợi nấm, phá vỡ cấu trúc thành tế bào, làm rò rỉ nguyên sinh chất và cuối cùng dẫn đến chết tế bào nấm. Trong các nghiên cứu tiếp theo, việc thực hiện các thử nghiệm đánh giá về nồng độ ức chế tối thiểu, nồng độ diệt nấm tối thiểu hoặc nồng độ ức chế 50% sự phát triển của nấm bởi CFS là cần thiết. Đồng thời, việc xác định tính ổn định và hiệu quả phòng bệnh trên cây ký chủ của CFS cũng là cần thiết, nhằm hoàn thiện cơ sở khoa học cho phát triển chế phẩm ứng dụng cho canh tác đậu nành.

3.3. Hoạt tính kháng nấm của các hợp chất hữu cơ dễ bay hơi sản sinh bởi các chủng *Bacillus*

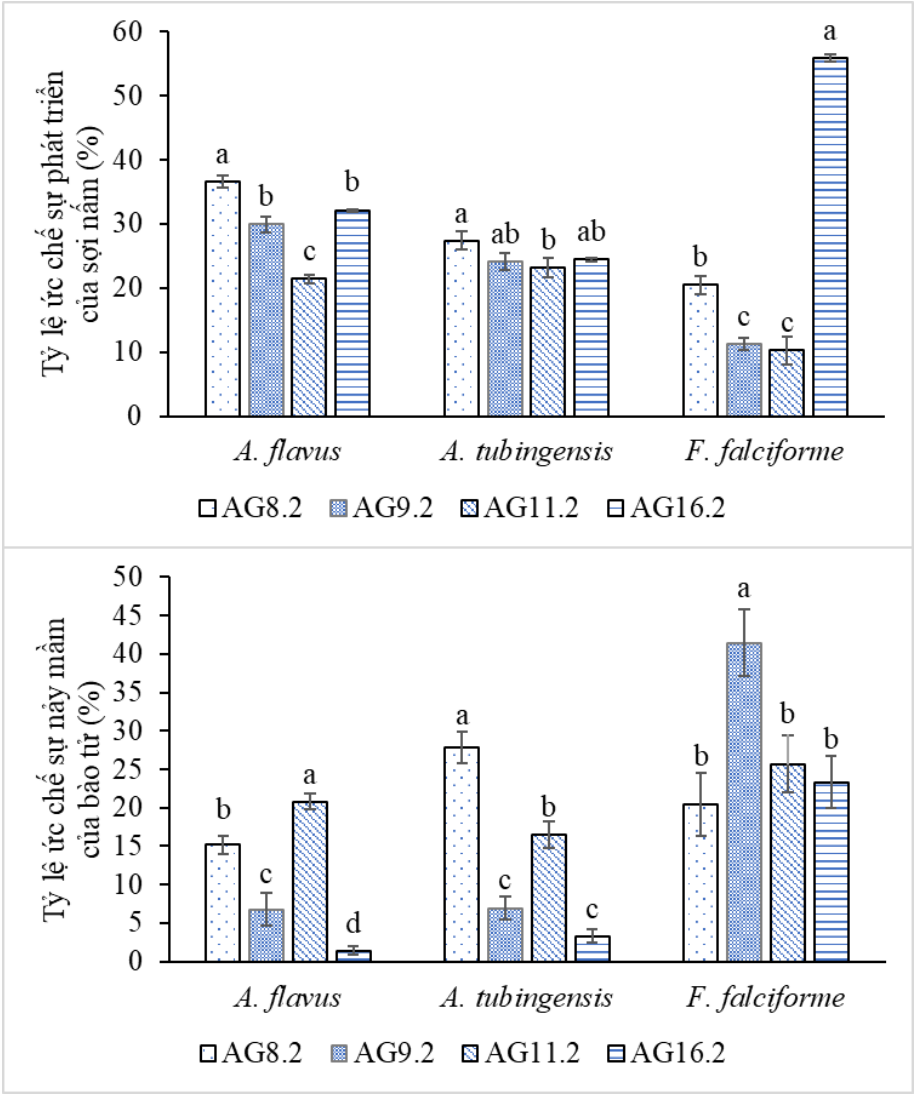
Các hợp chất hữu cơ dễ bay hơi do các chủng vi khuẩn sinh ra đều thể hiện khả năng ức chế sinh trưởng sợi nấm. Tỷ lệ ức chế sợi nấm *A. tubingensis*, *A. flavus* và *F. falciforme* bởi VOC dao động lần lượt là 23,1 - 27,4%, 21,4 - 36,5% và 10,2 - 55,9%. Đối với *A. tubingensis*, chủng AG8.2 cho tỷ lệ ức chế cao nhất (27,4%), trong khi trên *A. flavus*, chủng AG8.2 cũng đạt hiệu quả tốt nhất (36,5%). Chủng AG16.2 cho thấy hiệu quả ức chế cao đối với *F. falciforme* (55,91%), khác biệt có ý nghĩa thống kê so với các chủng còn lại.

VOC của các chủng vi khuẩn có khả năng ức chế sự nảy mầm bào tử ở mức khác nhau tùy loài nấm.Tỷ lệ ức chế sự nảy mầm của bào tử *A. tubingensis*, *A. flavus* và *F. falciforme* bởi VOC dao động lần lượt là 3,31 - 27,8%, 1,4 - 20,8% và 20,5 - 41,4%. Trên *A. tubingensis*, chủng AG8.2 đạt hiệu quả ức chế cao nhất (27,8%) ($p < 0,05$). Với *A. flavus*, AG11.2 cho khả năng ức chế tốt nhất (20,8%), khác biệt có ý nghĩa thống kê với các chủng còn lại. Đối với *F. falciforme*, AG9.2 thể hiện hiệu quả cao nhất với tỷ lệ ức chế 41,43% ($p < 0,05$). Nhìn chung, VOC từ 4 chủng *Bacillus* có tác động rõ rệt đến sự nảy mầm bào tử của *F. falciforme* hơn so với hai loài còn lại.

Kết quả này phù hợp với nhiều công bố trước đây về vai trò của VOCs từ vi khuẩn đối kháng trong kiểm soát nấm bệnh cây trồng. VOCs từ các chủng *Bacillus* đã được ghi nhận có khả năng ức chế mạnh nhiều loài *Fusarium* và *Aspergillus*, với thành phần chủ yếu gồm ketone, pyrazine, alkane, alcohol, acid hữu cơ và các hợp chất chứa nitơ (Guevara-Avendaño et al., 2020; Wang et al., 2025; AboDalam et al., 2026). Sự khác biệt trong đáp ứng của các loài nấm đối với VOCs cũng cho thấy tính đặc hiệu loài, tương đồng với kết quả quan sát trong nghiên cứu hiện tại.

Về cơ chế tác động, VOCs có thể mang lại ưu thế so với các hợp chất không bay hơi do khả năng khuếch tán trong không khí và thâm nhập vào khuẩn ty nấm mà không cần tiếp xúc trực tiếp với vi sinh vật sản sinh ra chúng (Van, 2025). Các hợp chất này có thể gây biến dạng sợi nấm, co rút nguyên sinh chất, phá hủy DNA, gây stress oxy hóa và rối loạn chuyển hóa tế bào nấm (Zhang et al., 2024b; Wang et al., 2025). Tuy nhiên, hoạt tính sinh học của VOCs thường là kết quả cộng hưởng của một hỗn hợp nhiều hợp chất khác nhau và chịu ảnh hưởng bởi điều kiện nuôi cấy cũng như nguồn dinh dưỡng sẵn có (Chaves-López et al., 2015; Van, 2025). Bên cạnh đó, sự khác biệt trong đáp ứng của các loài nấm có thể liên quan đến vị trí tác động của từng hợp chất hoặc khả năng giải độc của nấm đối với các chất chuyển hóa này (Chaves-López et al., 2015).

Khả năng ức chế đồng thời *Aspergillus* và *Fusarium* cho thấy VOCs từ các chủng *Bacillus* có tiềm năng ứng dụng trong quản lý bệnh hại đậu nành theo hướng an toàn và bền vững. Các nghiên cứu tiếp theo cần tập trung xác định thành phần VOCs bằng GC–MS và làm rõ cơ chế tác động ở mức tế bào và phân tử nhằm hỗ trợ phát triển chế phẩm sinh học ứng dụng trong thực tiễn.



Hình 3. Tỷ lệ ức chế sợi nấm và bào tử của 3 loài nấm thử nghiệm bởi các hợp chất hữu cơ dễ bay hơi sản sinh từ 4 chủng vi khuẩn *Bacillus*

Ghi chú: Kết quả trình bày là trung bình của ba lần lặp lại. Kết quả được trình bày dưới dạng trung bình±sai số chuẩn. Trong cùng một cụm, các cột có chữ cái theo sau giống nhau thể hiện sự khác biệt không có ý nghĩa thống kê theo phương pháp One-way ANOVA và phép kiểm định Fisher's LSD ở mức ý nghĩa 5%.

4. KẾT LUẬN

Các chủng *Bacillus velezensis* AG8.2, *B. thuringiensis* AG9.2, *B. siamensis* AG11.2 và *B. subtilis* AG16.2 cho thấy tiềm năng lớn trong kiểm soát sinh học nấm bệnh hại đậu nành. Kết quả nghiên cứu này góp phần làm rõ vai trò của các chất chuyển hóa từ *Bacillus* như nguồn hoạt chất sinh học tiềm năng trong quản lý nấm gây hại trên đậu nành theo hướng an toàn và bền vững. Trong tương lai, việc xác định các hợp chất kháng nấm chính và đánh giá hiệu quả phòng bệnh trong điều kiện nhà lưới và đồng ruộng cần tiếp tục được thực hiện nhằm hướng đến phát triển chế phẩm sinh học ứng dụng thực tiễn.

LỜI CẢM TẠ

Nhóm tác giả xin cảm ơn Đại học Cần Thơ đã tài trợ một phần kinh phí thực hiện đề tài nghiên cứu khoa học mã số T2025-122.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

AboDalam, H., Ragab, M., Zayton, M. E., & Mannaa, M. (2026). Biocontrol of *Aspergillus flavus* in stored wheat using *Bacillus* sp. B3 and *Bacillus* sp. Mn1 with antagonistic capacity through volatile compounds production. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, *36*, 7. https://doi.org/10.1186/s41938-025-00880-1

Agha, S. I., Ullah, M., Khan, A., Jahan, N., Ullah, S. M., Tabassum, B., Parveen, S., Rehmat, Z., Hussain, A., Ahmed, S., & Hamid Hamdard, M. (2023). Biocontrol rhizobacteria enhances growth and yield of wheat (*Triticum aestivum*) under field conditions against *Fusarium oxysporum*. *Bioengineered*, *14*(1), 2260923. https://doi.org/10.1080/21655979.2023.2260923

Aphaiso, P., Mahakhan, P., & Sawaengkaew, J. (2024). *Bacillus siamensis* 3BS12-4 Extracellular Compounds as a Potential Biological Control Agent against *Aspergillus flavus*. *Journal of microbiology and biotechnology*, *34*(8), 1671–1679. https://doi.org/10.4014/jmb.2402.02053

Chaves-López, C., Serio, A., Gianotti, A., Sacchetti, G., Ndagijimana, M., Ciccarone, C., Stellarini, A., Corsetti, A., & Paparella, A. (2015). Diversity of food-borne *Bacillus* volatile compounds and influence on fungal growth. *Journal of Applied Microbiology*, *119*(2), 487–499. https://doi.org/10.1111/jam.12847

Etesami, H., Jeong, B. R., & Glick, B. R. (2023). Biocontrol of plant diseases by *Bacillus* spp. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, *126*, 102048. https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2023.102048

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2026). *Crops and livestock products*. https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL on February 24, 2026.

Gowtham, H. G., Hariprasad, P., Chandra Nayak, S., & Niranjana, S. R. (2016). Application of rhizobacteria antagonistic to *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* for the management of *Fusarium* wilt in tomato. *Rhizosphere*, *2*, 72-74. http://dx.doi.org/10.1016/j.rhisph.2016.07.008

Guevara-Avendaño, E., Bravo-Castillo, K. R., Monribot-Villanueva, J. L., Kiel-Martínez, A. L., Ramírez-Vázquez, M., Guerrero-Analco, J. A., & Reverchon, F. (2020). Diffusible and volatile organic compounds produced by avocado rhizobacteria exhibit antifungal effects against *Fusarium kuroshium*. *Brazilian Journal of Microbiology*, *51*(3), 861–873. https://doi.org/10.1007/s42770-020-00249-6

Hafez, M., Abdelmagid, A., Aboukhaddour, R., Adam, L. R., & Daayf, F. (2021). *Fusarium* Root Rot Complex in Soybean: Molecular Characterization, Trichothecene Formation, and Cross-Pathogenicity. *Phytopathology*, *111*(12), 2287–2302. https://doi.org/10.1094/PHYTO-03-21-0083-R

Han, J. H., Shim, H., Shin, J. H., & Kim, K. S. (2015). Antagonistic activities of *Bacillus* spp. strains isolated from tidal flat sediment towards anthracnose pathogens *Colletotrichum acutatum and C. gloeosporioides* in South Korea. *The Plant Pathology Journal*, *31*(2), 165-175. https://doi.org/10.5423/PPJ.OA.03.2015.0036

Han, S., Chen, J., Zhao, Y., Cai, H., & Guo, C. (2021a). *Bacillus subtilis* HSY21 can reduce soybean root rot and inhibit the expression of genes related to the pathogenicity of *Fusarium oxysporum*. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, *178*, 104916. https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2021.104916

Han, X., Shen, D., Xiong, Q., Bao, B., Zhang, W., Dai, T., Zhao, Y., Borriss, R., & Fan, B. (2021b). The Plant-Beneficial Rhizobacterium *Bacillus velezensis* FZB42 Controls the Soybean Pathogen *Phytophthora sojae* Due to Bacilysin Production. *Applied and Environmental Microbiology*, *87*(23), e0160121. https://doi.org/10.1128/AEM.01601-21

Hirozawa, M. T., Ono, M. A., de Souza Suguiura, I. M., Bordini, J. G., Hirooka, E. Y., & Ono, E. Y. S. (2024). Antifungal effect and some properties of cell-free supernatants of two *Bacillus subtilis* isolates against *Fusarium verticillioides*. *Brazilian Journal of Microbiology*, *55*(3), 2527–2538. https://doi.org/10.1007/s42770-024-01414-x

Li, Z., He, F., Gai, X., Zhu, H., He, S., Xuan, Y. H., & Bai, L. (2025). The growth, development and infection process of the plant pathogen *Fusarium*. *Plant signaling & behavior*, *20*(1), 2573097. https://doi.org/10.1080/15592324.2025.2573097

Liên, N. T., Oanh, N. T. P., & Khoa, N. Đ. (2023). Nghiên cứu đặc điểm của *Bacillus amyloliquefaciens* VL4.6 tác nhân kiểm soát sinh học đối kháng với *Colletotrichum lagenarium* gây bệnh thán thư trên dưa leo. *Tạp chí Nông nghiệp và Phát triển Nông thôn*, *10*, 34-41.

Liu, Y., Wei, X., Chang, F., Yu, N., Guo, C., & Cai, H. (2023). Distribution and Pathogenicity of *Fusarium* Species Associated with Soybean Root Rot in Northeast China. *The Plant Pathology Journal*, *39*(6), 575–583. https://doi.org/10.5423/PPJ.OA.06.2023.0086

Moreira, R. F., Pires, E. B. E., Sousa, O. F., Alves, G. B., Viteri Jumbo, L. O., Santos, G. R., Maia, L. J., Ribeiro, B. M., Smagghe, G., Perino, E. H. B., Hausmann, R., Oliveira, E. E., & Aguiar, R. W. S. (2025). A Novel Neotropical *Bacillus siamensis* Strain Inhibits Soil-Borne Plant Pathogens and Promotes Soybean Growth. *Microorganisms*, *13*(6), 1366. https://doi.org/10.3390/microorganisms13061366

Olszak-Przybyś, H., Przybyś, M., Bojarszczuk, J., & Księżak, J. (2026). Characterization of Fungi Communities in Organic Soybean Seeds Using DNA Sequencing: Effects of Cultivar and Location. *Pathogens (Basel, Switzerland)*, *15*(2), 239. https://doi.org/10.3390/pathogens15020239.

Pagano, M. C., & Miransari, M. (2016). 1-The importance of soybean production worldwide. Abiotic and biotic stresses in soybean production. In: M. Miransari (Eds), *Abiotic and Biotic Stresses in Soybean Production Soybean Production: Volume 1* (pp. 1–26). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801536-0.00001-3

Shafi, J., Tian, H., & Ji, M. (2017). *Bacillus* species as versatile weapons for plant pathogens: a review. *Biotechnology and Biotechnological Equipment*, *31*(3), 446–459. https://doi.org/10.1080/13102818.2017.1286950

Sun, L., Wang, W., Zhang, X., Gao, Z., Cai, S., Wang, S., & Li, Y. (2023). *Bacillus velezensis* BVE7 as a promising agent for biocontrol of soybean root rot caused by *Fusarium oxysporum*. *Frontiers in Microbiology*, *14*, 1275986. https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1275986

Trinh, L. L., Nguyen, N. M. D, & Nguyen, H. H. (2024). Cell-free supernatant crude extracts of mold-competing bacteria protect peanut crops against yellow mold disease caused by *Aspergillus flavus* AF1. *Biocatalysis and agricultural biotechnology*, *56*, 103028. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103028

Tudi, M., Daniel Ruan, H., Wang, L., Lyu, J., Sadler, R., Connell, D., Chu, C., & Phung, D. T. (2021). Agriculture Development, Pesticide Application and Its Impact on the Environment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *18*(3), 1112. https://doi.org/10.3390/ijerph18031112

Van, A. (2025). Microbial Volatile Organic Compound: Biochemical Signatures and Applications. *Journal of microbial and biochemical technology*, *17*, 635.

Wang, Y., Yuan, J., Zhao, R., Yuan, S., Su, Y., Jiao, W., Huo, X., Wang, M., Fan, W., & Wang, C. (2025). Biocontrol Activity of Volatile Organic Compounds Emitted from *Bacillus paralicheniformis* 2-12 Against *Fusarium oxysporum* Associated with *Astragalus membranaceus* Root Rot. *Microorganisms*, *13*(8), 1782. https://doi.org/10.3390/microorganisms13081782

Wu, L., Hwang, S. F., Strelkov, S. E., Fredua-Agyeman, R., Oh, S. H., Bélanger, R. R., Wally, O., & Kim, Y. M. (2024). Pathogenicity, Host Resistance, and Genetic Diversity of *Fusarium* Species under Controlled Conditions from Soybean in Canada. *Journal of Fungi*, *10*(5), 303. https://doi.org/10.3390/jof10050303

Yuan, S., Wu, Y., Jin, J., Tong, S., Zhang, L., & Cai, Y. (2023). Biocontrol Capabilities of *Bacillus subtilis* E11 against *Aspergillus flavus In Vitro* and for Dried Red Chili (*Capsicum annuum* L.). *Toxins*, *15*(5), 308. https://doi.org/10.3390/toxins15050308.

Zhang, C., Liu, Z., Yang, Y., Ma, Q., Zheng, Y., Xu, C., Gao, X., Gao, W., Huang, Z., & Liu, X. (2024a). Characterization of *Fusarium* species causing soybean root rot in Heilongjiang, China, and mechanism underlying the differences in sensitivity to DMI fungicides. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, *200*, 105828. https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2024.105828

Zhang, Y., Li, Z., Wei, S., Xu, C., Chen, M., Sang, J., Han, Y., Yan, H., Li, Z., Cui, Z., & Ye, X. (2024b). Antifungal Activity and Mechanisms of 2-Ethylhexanol, a Volatile Organic Compound Produced by *Stenotrophomonas* sp. NAU1697, against *Fusarium oxysporum* f. sp. *cucumerinum*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *72*(27), 15213–15227. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c09851

Zhu, Q., Ma, Y., Zhang, T., Liu, W., Zhang, S., Chen, Y., Peng, D., & Zhang, X. (2025). Biocontrol Potential of Rhizosphere Bacteria Against *Fusarium* Root Rot in Cowpea: Suppression of Mycelial Growth and Conidial Germination. *Biology*, *14*(8), 921. https://doi.org/10.3390/biology1408092