



DOI:10.22144/ctujos.2026.120

## ỨNG DỤNG CÔNG NGHỆ NANO TRONG NÔNG NGHIỆP

Nguyễn Phạm Anh Thi\*, Võ Thành Thái, Bùi Doãn Thành Trường, Huỳnh Tiến Đạt và Nguyễn Chánh Tín

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

\*Tác giả liên hệ (Corresponding author): [npathi@ctu.edu.vn](mailto:npathi@ctu.edu.vn)

### Thông tin chung (Article Information)

Nhận bài (Received): 01/08/2025

Sửa bài (Revised): 17/10/2025

Duyệt đăng (Accepted): 26/05/2026

**Title:** *Advances and applications of nanotechnology in agriculture: An overview*

**Author(s):** *Nguyen Pham Anh Thi\*, Vo Thanh Thai, Bui Doan Thanh Truong, Huynh Tien Dat and Nguyen Chanh Tin*

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

### TÓM TẮT

Công nghệ nano đang mở ra hướng đi chiến lược cho nông nghiệp hiện đại nhờ khả năng can thiệp ở cấp độ phân tử. Vật liệu nano có diện tích bề mặt lớn và tính phản ứng cao, ứng dụng hiệu quả trong nhiều khâu sản xuất. Cụ thể, phân bón nano cung cấp dinh dưỡng có kiểm soát, tăng hấp thu và giảm thất thoát khi bón vào đất. Thuốc trừ sâu nano như nano đồng, bạc giúp kiểm soát sâu bệnh hiệu quả, giảm độc hại và tồn dư trong sản phẩm nông nghiệp. Trong chăn nuôi, công nghệ nano được ứng dụng trong việc cải thiện chất lượng thức ăn, tăng hiệu quả kháng sinh và chế tạo các chế phẩm nano probiotic. Bao bì nano có tính kháng khuẩn, chống oxy hóa và giúp kéo dài thời gian sử dụng cho các sản phẩm nông nghiệp. Tuy nhiên, công nghệ nano còn tiềm ẩn nhiều rủi ro đối với hệ sinh thái môi trường nên cần có nhiều nghiên cứu sâu rộng hơn nữa để ứng dụng có hiệu quả công nghệ nano vào nông nghiệp bền vững và lâu dài.

**Từ khóa:** Công nghệ nano, bao bì nano, nano probiotic, nông nghiệp, phân bón nano

### ABSTRACT

Nanotechnology is opening a strategic direction for modern agriculture due to its ability to operate at the molecular level. Nanomaterials, characterized by a large surface area and high reactivity, are effectively applied in various stages of production. Specifically, nano-fertilizers provide controlled nutrient release, enhance absorption, and reduce nutrient losses when applied to soil. Nano-pesticides, such as nano-copper and nano-silver, effectively control pests while reducing toxicity and residue in agricultural products. In animal husbandry, nanotechnology helps improve feed quality, enhance antibiotic efficiency, and develop nano-probiotic formulations. Nano-packaging materials possess antibacterial and antioxidant properties, extending the shelf life of agricultural products. However, nanotechnology still poses potential risks to environmental ecosystems; therefore, further comprehensive research is needed to ensure its effective, sustainable, and long-term application in agriculture.

**Keywords:** *Agriculture, nano-fertilizers, nano-packaging, nano-probiotic, nanotechnology*

## 1. GIỚI THIỆU

Trong những năm gần đây, hệ thống nông nghiệp toàn cầu đang trải qua những biến động mạnh mẽ dưới tác động đồng thời của biến đổi khí hậu, suy thoái tài nguyên và dịch bệnh cây trồng lan rộng. Hiện tượng thời tiết cực đoan như hạn hán kéo dài, nhiệt độ tăng cao và mưa lớn bất thường cũng đang ảnh hưởng trực tiếp đến năng suất cây trồng trên quy mô toàn cầu. Đồng thời, sự bùng phát của các dịch bệnh thực vật gây ra bởi nhiều chủng vi khuẩn và nấm có khả năng kháng thuốc đã và đang gây thiệt hại đáng kể và đe dọa an ninh lương thực tại nhiều khu vực đang phát triển. Song song đó, nhu cầu tăng sản lượng lương thực do dân số toàn cầu dự kiến vượt mốc 9,7 tỷ người vào năm 2050 tiếp tục tạo áp lực lên hệ thống canh tác vốn đã quá tải (Bhanuprakash et al., 2023; Sands et al., 2023).

Hai thách thức lớn của trồng trọt hiện nay là kiểm soát hiệu quả dịch hại và tối ưu hóa việc cung cấp dinh dưỡng cho cây. Hiệu suất hấp thu phân bón truyền thống còn thấp, khi cây chỉ sử dụng khoảng 30-35% nitơ và 20% photpho, phần còn lại thất thoát ra môi trường gây ô nhiễm nghiêm trọng (Subramanian et al., 2015; Bhanuprakash et al., 2023). Đồng thời, việc lạm dụng thuốc bảo vệ thực vật dẫn đến hiện tượng kháng thuốc, tồn dư hóa chất và suy giảm hệ vi sinh vật đất (Neme et al., 2021; Vijayakumar et al., 2022). Trong bối cảnh đó, công nghệ nano nổi lên như giải pháp tiềm năng giúp cải thiện hiệu quả sử dụng dinh dưỡng và kiểm soát dịch hại. Các phân bón nano như nHAP, nano-ZnO hoặc composite chitosan-ZnO có khả năng giải phóng chậm, tăng hấp thu dinh dưỡng 20-50% và giảm phát thải ra môi trường (Vaidya et al., 2024; Mariyam et al., 2024). Bên cạnh đó, nanopesticide và nano-fungicide (AgNPs, CuO-NPs, TiO<sub>2</sub>-NPs, chitosan-NPs) vừa có hoạt tính kháng khuẩn, kháng nấm, vừa có thể mang hoạt chất sinh học giúp kéo dài hiệu lực và giảm độc tính ngoài mục tiêu (Gupta et al., 2023).

Ngành chăn nuôi hiện đại đang đối mặt với một thách thức kép: vừa phải nâng cao năng suất để đáp ứng nhu cầu ngày càng tăng, vừa phải giảm thiểu việc sử dụng kháng sinh do lo ngại về tình trạng kháng kháng sinh trên toàn cầu. Việc lạm dụng kháng sinh không chỉ ảnh hưởng đến sức khỏe vật nuôi mà còn tiềm ẩn nguy cơ cho sức khỏe con người. Để giải quyết vấn đề này, công nghệ nano mang đến một giải pháp đột phá thông qua việc phát triển các chất phụ gia thức ăn thế hệ mới. Các hạt nano, chẳng hạn như nano kẽm và nano selen, khi được bổ sung vào thức ăn, giúp cải thiện đáng kể

khả năng hấp thụ dinh dưỡng, tăng cường hệ miễn dịch và thúc đẩy sự tăng trưởng của vật nuôi (Gangadoo et al., 2020; Yang et al., 2025). Quan trọng hơn, nhờ đặc tính kháng khuẩn mạnh mẽ, các vật liệu nano này có thể hoạt động như một giải pháp thay thế hiệu quả cho kháng sinh, giúp kiểm soát mầm bệnh mà không gây ra tình trạng kháng thuốc (El-Shenawy et al., 2023).

Tồn thất sau thu hoạch cũng là một trong những vấn đề nghiêm trọng nhất của ngành nông nghiệp, gây lãng phí tài nguyên và thiệt hại kinh tế nặng nề. Nguyên nhân chính của sự hư hỏng này là do hoạt động của vi sinh vật và các quá trình oxy hóa tự nhiên. Các phương pháp bảo quản truyền thống thường có hiệu quả hạn chế và đôi khi sử dụng các hóa chất không an toàn. Công nghệ nano cung cấp các giải pháp tiên tiến thông qua việc phát triển bao bì thông minh và bao bì hoạt tính. Bằng cách tích hợp các hạt nano có đặc tính kháng khuẩn, chẳng hạn như nano bạc (AgNPs) hoặc nano kẽm oxide (ZnO-NPs), vào màng bao bì, một rào cản vật lý được tạo ra để ngăn chặn sự xâm nhập và phát triển của vi sinh vật (Anvar et al., 2021; Barage et al., 2022). Các vật liệu nano này không chỉ giúp kéo dài thời gian tươi ngon của nông sản mà còn có thể tích hợp các cảm biến nano để cảnh báo về sự hư hỏng, đảm bảo chất lượng và an toàn thực phẩm từ trang trại đến tay người tiêu dùng (Ahari et al., 2025).

Tuy nhiên, việc triển khai công nghệ nano ở quy mô lớn vẫn cần phải có sự nghiên cứu chuyên sâu hơn nữa để có thể giảm thiểu tối đa những hạn chế tiềm ẩn. Trên cơ sở đó, bài tổng quan này sẽ tập trung đánh giá các loại vật liệu nano phổ biến, cơ chế tác động của chúng lên cây trồng, các ứng dụng tiêu biểu trong cải thiện dinh dưỡng và kháng bệnh, đồng thời thảo luận những thách thức còn tồn tại.

## 2. TỔNG QUAN VỀ VẬT LIỆU NANO

### 2.1. Định nghĩa và đặc điểm của vật liệu nano

Vật liệu nano (nanomaterials-NMs) là những hạt có cấu trúc nhỏ hơn 100 nm, nơi các hiệu ứng lượng tử và tỷ lệ diện tích bề mặt cao dẫn đến những tính chất lý-hóa học khác biệt hoàn toàn so với vật liệu cùng thành phần ở kích thước lớn hơn (Mekuye & Abera, 2023). Ở quy mô này, độ hòa tan, khả năng phản ứng bề mặt, hoạt tính sinh học và khả năng kiểm soát giải phóng đều được tăng cường đáng kể. Trong bối cảnh nông nghiệp, các đặc tính này cho phép vật liệu nano hoạt động như phân bón thông minh, thuốc trừ sâu nhắm đích, hoặc vector vận chuyển phân tử sinh học (Gupta et al., 2023; Mariyam et al., 2024). Sự kết hợp giữa tính năng cơ

học, hóa học và sinh học trong một cấu trúc nano đơn lẻ tạo điều kiện cho các ứng dụng đa chức năng

– Điều mà vật liệu truyền thống khó có thể đáp ứng.

Tuy nhiên, không phải mọi vật liệu nano đều vô hại, mà trên thực tế tính an toàn của nano còn phụ thuộc chặt chẽ vào kích thước, điện tích bề mặt, độ ổn định, khả năng giải phóng ion, khả năng tích lũy sinh học, cũng như liều lượng, tần suất sử dụng, thời gian tồn lưu và khả năng phân hủy sinh học (Thu et al., 2023).

## 2.2. Phân loại vật liệu nano

### 2.2.1. Phân loại theo nguồn gốc

Vật liệu nano được phân chia thành hai nhóm chính dựa theo nguồn gốc hình thành:

Vật liệu nano tự nhiên bao gồm các vật liệu tồn tại dưới dạng nano trong môi trường như keo sinh học, khoáng sét hoặc cấu trúc nano sinh học (virus, protein). Dù có sẵn trong tự nhiên, nhóm này hiếm khi được khai thác trực tiếp cho nông nghiệp do khó kiểm soát tính chất và độ ổn định (Mekuye & Abera, 2023).

Vật liệu nano nhân tạo bao gồm các hạt được tổng hợp có chủ đích thông qua các phương pháp vật lý (nghiền, hóa hơi), hóa học (sol-gel, kết tủa) hoặc sinh học (sử dụng vi sinh vật hoặc chiết xuất thực vật). Đây là nhóm vật liệu tiềm năng trong nông nghiệp hiện nay nhờ khả năng kiểm soát cấu trúc, thành phần và chức năng một cách chính xác (Mariyam et al., 2024).

### 2.2.2. Phân loại theo thành phần và đặc tính ứng dụng

Dựa trên cấu trúc hóa học và chức năng, vật liệu nano được phân loại thành các nhóm chính sau:

Vật liệu hữu cơ gồm polymer sinh học như chitosan, gelatin, hoặc cellulose, thường dùng làm hệ vận chuyển (nanocarrier) nhờ khả năng phân hủy sinh học và tương thích sinh học cao. Các hạt chitosan-ZnO, chitosan-AgNPs đã được chứng minh có khả năng vận chuyển đồng thời dinh dưỡng và chất kháng khuẩn (Subramanian et al., 2015; Bhanuprakash et al., 2023).

Oxit kim loại và kim loại thuần gồm ZnO-NPs, CuO-NPs, TiO<sub>2</sub>-NPs, AgNPs... được ứng dụng rộng rãi nhờ hoạt tính kháng khuẩn mạnh, khả năng tạo ROS và ổn định dưới điều kiện môi trường khắc nghiệt. Tuy nhiên, một số hạt như AgNPs hoặc CuO-NPs có tiềm năng gây tích lũy sinh học hoặc stress oxy hóa nếu sử dụng không kiểm soát (Grün et al., 2018; Vaidya et al., 2024).

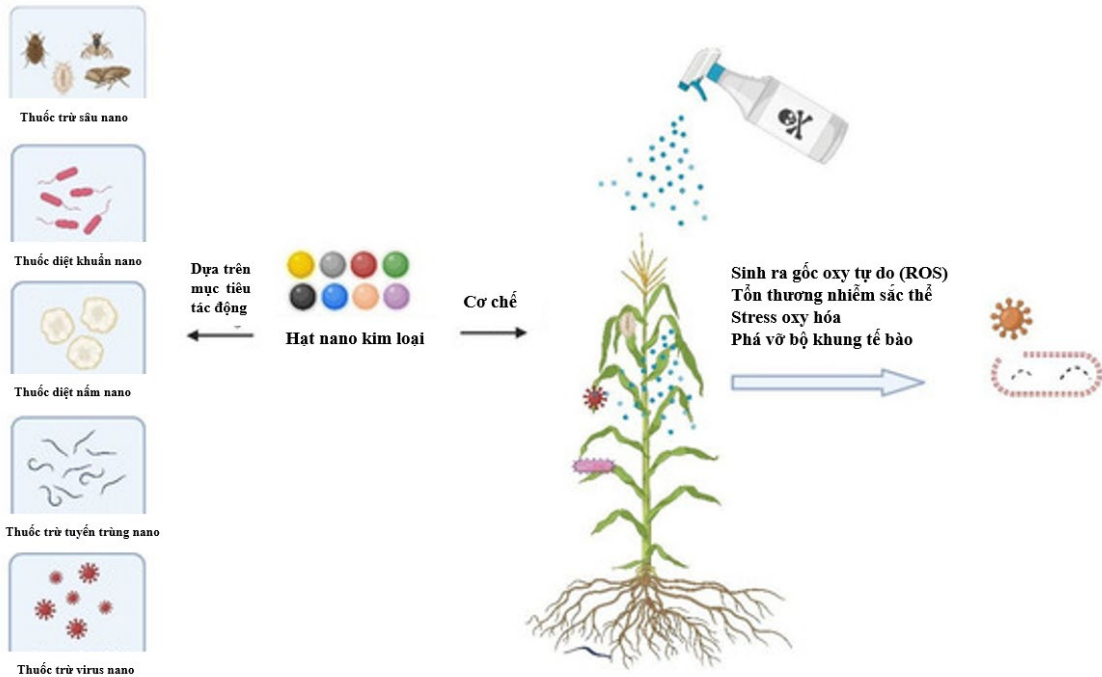
Vật liệu nano có gốc cacbon (Carbon-based nanomaterials) như ống nano cacbon (carbon nanotubes-CNTs), graphen oxit và fulleren, nổi bật với độ bền cơ học cao và khả năng dẫn điện, thường được tích hợp trong cảm biến hoặc màng bao thông minh. Tuy nhiên, vấn đề phân hủy sinh học và độc tính tiềm ẩn đối với vi sinh vật đất vẫn là rào cản lớn cho việc ứng dụng đại trà (Vijayakumar et al., 2022).

Vật liệu nanocomposite là sự kết hợp của hai hoặc nhiều vật liệu nano để tạo ra hệ đa chức năng. Ví dụ, chitosan-ZnO không chỉ mang dinh dưỡng vi lượng mà còn tăng tính kháng nấm; composite silica-hydroxyapatite giúp giải phóng đồng thời N-P-K trong hệ gel bền (Mariyam et al., 2024; Meng et al., 2025). Nanocomposite đang trở thành xu hướng mới trong thiết kế vật liệu nông nghiệp thế hệ tiếp theo nhờ sự linh hoạt và tối ưu hóa tính năng theo yêu cầu.

## 2.3. Cơ chế hoạt động cơ bản của vật liệu nano

### 2.3.1. Cơ chế giải phóng có kiểm soát

Nhờ kích thước siêu nhỏ và cấu trúc đa porosity, nhiều hệ nano như hydroxyapatite (nHAP), zeolite và chitosan-ZnO cho phép bao gói các ion dinh dưỡng hoặc hoạt chất sinh học, từ đó giải phóng chậm theo thời gian và nhắm đích đến mô rễ hoặc mô lá (Shah et al., 2024; Vaidya et al., 2024). Trong báo cáo của Vaidya et al. (2024), hạt nHAP có kích thước khoảng 16 nm duy trì giải phóng PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> trong đất kéo dài, giúp cây ngô hấp thu hiệu quả với chỉ 20% lượng P so với phân truyền thống. Tương tự, chitosan-ZnO composite đã chứng minh khả năng điều tiết giải phóng Zn<sup>2+</sup> trong khoảng 7-14 ngày, đồng thời duy trì nồng độ kháng khuẩn cần thiết trên bề mặt lá (Bhanuprakash et al., 2023).



**Hình 1. Cơ chế tác động phòng trừ sâu bệnh của các hạt nano kim loại**

(Shandila et al., 2025)

**2.3.2. Cơ chế hoạt tính sinh học trực tiếp**

Một số vật liệu nano kim loại (như AgNPs, CuO-NPs, TiO<sub>2</sub>-NPs) có khả năng sinh ROS (Reactive Oxygen Species) hoặc gắn kết protein màng tế bào vi sinh vật, gây tổn thương màng, làm rối loạn chức năng enzyme và dẫn đến chết tế bào mầm bệnh (Grün et al., 2018; Mariyam et al., 2024). Các hạt nano AgNPs có kích thước từ 10-50 nm được ghi nhận diệt vi khuẩn gây thối gốc và bệnh sương mai hiệu quả, với cơ chế kháng khuẩn kép: giải phóng ion Ag<sup>+</sup> và sinh ROS nội bào (Shandila et al., 2025) (Hình 1). Đồng thời, CuO-NPs kích hoạt biểu hiện các gene phòng vệ nội sinh ở cây cà chua, tăng tổng hợp phenolic và flavonoid. Đây những hợp chất có khả năng ức chế nấm (Mariyam et al., 2024).

**2.3.3. Cơ chế tương tác dinh dưỡng và tín hiệu sinh trưởng**

Vật liệu nano không chỉ mang dưỡng chất mà còn kích thích hoạt động của enzyme nội sinh và điều chỉnh quá trình truyền tín hiệu hormone. Các hạt nano silica và TiO<sub>2</sub> đã chứng minh khả năng tăng hoạt tính superoxit dismutase (SOD) và peroxidase (POD), giảm áp lực oxy hóa trong điều kiện hạn mặn, qua đó giữ vững quang hợp và cân bằng nội môi ở lá (Meng et al., 2025). Đồng thời, nano-ZnO kích thích biểu hiện các gene điều hòa hấp thu Zn (ZIP family) và tăng cường phát triển rễ, nhờ ảnh

hưởng đến đường truyền tín hiệu auxin và cytokinin (Gupta et al., 2023).

**3. ỨNG DỤNG VẬT LIỆU NANO TRONG NÔNG NGHIỆP**

Vật liệu nano đang thực sự là tiềm năng quan trọng trong nông nghiệp hiện đại với nhiều đóng góp giúp nâng cao năng suất cây trồng và vật nuôi. Các ứng dụng rộng rãi như phân bón, thuốc trừ sâu làm tăng hiệu quả sử dụng và giảm dư lượng. Các thiết bị nano còn hỗ trợ kỹ thuật di truyền để tạo giống cây kháng sâu bệnh. Trong chăn nuôi, đã góp phần cải thiện sức khỏe vật nuôi và chất lượng giống, hứa hẹn mang lại nhiều kết quả tích cực.

**3.1. Trong trồng trọt**

**3.1.1. Phân bón nano**

Phân bón được sử dụng rộng rãi trên thế giới với nhiệm vụ cốt lõi đảm bảo an ninh lương thực của mỗi quốc gia (Verma et al., 2022). Hiện nay, xu hướng sử dụng phân bón mới hiệu quả nhanh, thân thiện môi trường và đặc biệt là phân bón nano đang nhận được sự quan tâm lớn nhằm đáp ứng yêu cầu phát triển bền vững lâu dài. Việc áp dụng phân bón nano vào nông nghiệp có thể cho thấy thế giới đang có bước tiến quan trọng hướng đến nền nông nghiệp bền vững, hạn chế ô nhiễm môi trường (Upadhyay et al., 2023).

Phân bón nano với kích thước nhỏ, hiệu quả trong cung cấp dinh dưỡng cho cây trồng, dễ dàng đi vào đất đảm bảo quá trình hấp thu dinh dưỡng. Với kích thước hạt từ 1-100 nm, cho hiệu quả hấp thu dinh dưỡng cao hơn 20-30% so với phân bón truyền thống nhờ khả năng thẩm thấu tốt và giải phóng dinh dưỡng từ từ. Nhờ đó, chúng giúp tăng năng suất, thúc đẩy sinh trưởng cây trồng và giảm lãng phí trong canh tác hiện đại (Mahmud et al., 2025).

Nghiên cứu của Upadhyay et al. (2023) đã đánh giá hiệu quả của nano-N, nano-Zn và nano-Cu dạng lỏng với mục tiêu tăng năng suất cây trồng và giải quyết tình trạng thiếu hụt dinh dưỡng mà không gây độc hại. Phân bón nano được kết hợp nano-N và nano-Zn với phân đạm truyền thống được bón trực tiếp vào đất hoặc lá giúp tăng năng suất, hấp thu dinh dưỡng. Phối trộn 75% N + nano-N + nano-Zn vẫn cho năng suất vượt 100% N thông thường. Nano-Cu không có hiệu quả rõ rệt. Đã cho thấy tiềm năng giảm 25% lượng phân bón N cần thiết khi kết hợp nano-N và nano-Zn vẫn duy trì năng suất.

**Bảng 1. Các sản phẩm ứng dụng vật liệu nano trong phân bón nông nghiệp**

STT	Tên sản phẩm	Xuất xứ	Công ty sản xuất	Công dụng
1	Nano N-P-K	Việt Nam	Công ty Cổ phần Nano Việt Nam Technology	Giúp cây trồng hấp thu nhanh, hút dinh dưỡng mạnh. Thúc cây bung đọt mạnh, đồng loạt, đâm chồi mập khỏe. Dưỡng lá xanh mượt, quang hợp tốt. Cây sung khỏe, nuôi trái lớn nhanh, chắc ruột, nặng ký.
2	Eco OK	Việt Nam	Công ty cổ phần công nghệ Nano BSB	Tác động tích cực đến quá trình trao đổi chất dinh dưỡng và phát triển rễ, đơm hoa, dưỡng trái, hạn chế tối đa nhiễm các bệnh gây ra bởi vi khuẩn, virus và nấm.
3	PAN nano	Việt Nam	Công ty CP Công nghiệp Nano Đặng Quang	Tăng sức đề kháng của cây trồng. Tăng thời gian bảo quản sau thu hoạch. Tăng khả năng chống chịu các loại sâu bệnh.
4	HLC01	Việt Nam	Công ty cổ phần HLC Hà Nội	Thay thế phân bón, bổ sung vi lượng đất hiếm. Hỗ trợ bung đọt, phát triển thân lá mạnh. Tăng khả năng kháng bệnh cho cây trồng.
5	Nano Urea	Ấn Độ	Indian Farmers Fertiliser Cooperative (IFFCO)	Tăng hiệu quả hấp thu đạm, giảm phát thải amoniac, phân bón ít hao; tiết kiệm chi phí, tăng năng suất.
6	RhizoSorb (Phospholutions)	Hoa Kỳ	Phospholutions Inc.	Dùng trong các hệ thống tưới nhỏ giọt, giúp cây tận dụng phốt pho tối ưu, giảm phân bón và bảo vệ môi trường

**3.1.2. Thuốc bảo vệ thực vật nano**

Theo Cơ quan An toàn Thực phẩm Châu Âu (European Food Safety Authority - EFSA), thuốc trừ sâu là hóa chất dùng để ngăn ngừa và kiểm soát sâu bệnh, nhằm bảo vệ cây trồng trong suốt quá trình sản xuất, bảo quản và vận chuyển (EFSA, 2025). Trong đó, thuốc trừ sâu nano là một hướng đi tiên tiến trong nông nghiệp, ứng dụng công nghệ nano để tăng hiệu quả bảo vệ thực vật. Nhờ kích thước siêu nhỏ, thuốc nano giúp tăng khả năng xâm nhập vào mô cây, kéo dài thời gian tác dụng, giảm liều lượng sử dụng và hạn chế ô nhiễm môi trường (Shandila et al., 2025). Đặc biệt, các chế phẩm này có khả năng nhắm đích chính xác vào sâu bệnh,

đồng thời giảm thiểu tác động đến sinh vật có lợi, qua đó góp phần bảo vệ đa dạng sinh học và hệ sinh thái.

Về ứng dụng thực tiễn, thuốc trừ sâu nano có thể được sử dụng qua các phương pháp như phun lên lá, xử lý hạt giống hoặc đất. Một số hạt nano như AgNP, ZnONP, CuONP còn có khả năng diệt khuẩn mạnh thông qua việc phá hủy màng tế bào, gây stress oxy hóa và ức chế enzyme sinh học (El-Enain et al., 2023). Một nghiên cứu về phòng trừ bệnh hại của Vaidya et al. (2024), khi phun foliar CuO-NPs (30 nm) ở nồng độ 0,15-0,34 g/L đã giúp kiểm soát hiệu quả bệnh sương mai do Phytophthora infestans

trên cà chua, với hiệu lực cao hơn đáng kể so với thuốc hóa học thương mại Kocide 2000.

Cơ chế hoạt động của thuốc trừ sâu (i) Phá vỡ màng tế bào: MgONP và AgNP tương tác với lớp phospholipid, làm mất tính toàn vẹn của màng và gây rò rỉ tế bào chất, (ii) Tổn thương DNA: các hạt CuNP có thể xuyên vào tế bào và liên kết với DNA, gây đứt gãy chuỗi, làm gián đoạn quá trình sao chép và phiên mã, (iii) Rối loạn chức năng ty thể: MNP tích tụ trong ty thể, làm giảm sản xuất ATP và cản trở chuyển hóa năng lượng, (iv) Biến tính protein: các hạt nano tương tác với protein nội bào, làm thay đổi cấu hình không gian và mất chức năng. Ngoài ra, quá trình hình thành lớp corona protein bao quanh hạt nano có thể ảnh hưởng đến cấu trúc và chức năng protein (Shandila et al., 2025). Tất cả các cơ chế trên đều góp phần gây rối loạn và dẫn đến chết tế bào theo chương trình, làm tăng hiệu quả kiểm soát sâu bệnh ở mức tế bào học.

### 3.1.3. Kích thích sinh trưởng

Giúp cây trồng phát triển nhanh chóng, yếu tố quan trọng và ảnh hưởng đến năng suất là chất điều hòa sinh trưởng. Quá trình này có thể được thúc đẩy bằng các biện pháp nhân tạo, thông qua điều chỉnh hormone nội sinh như auxin, gibberellin hoặc bổ sung yếu tố ngoại sinh như chất kích thích sinh trưởng và điều kiện môi trường phù hợp, được nghiên cứu rộng rãi. Để hiểu rõ hơn về tác dụng kích thích sinh trưởng, một số nghiên cứu điển hình được công bố trong những năm gần đây.

Chitosan là một hợp chất có nguồn gốc tự nhiên, được đánh giá cao, đặc biệt được ứng dụng trong nông nghiệp. Ở dạng hạt nano (ChNP), chitosan có những hoạt tính nổi bật như khả năng kháng nấm, chống oxy hóa và kích thích phản ứng miễn dịch ở thực vật (Ingle et al., 2022). Dù không phải là hormone sinh trưởng nội sinh, ChNP vẫn được xem như một chất điều hòa sinh trưởng nhờ vào tác dụng tích cực lên cây trồng như: tăng tỷ lệ nảy mầm, thúc đẩy hấp thu dinh dưỡng và cải thiện hiệu suất quang hợp. Nghiên cứu (Van et al., 2013) cho thấy khi phun lên lá cây cà phê Robusta, ChNP giúp cây hấp thu tốt hơn các khoáng chất như Ca, K, N, Mg và P, đồng thời làm tăng hàm lượng diệp lục cũng như tốc độ quang hợp so với dạng chitosan oligomer. Những kết quả này cho thấy ChNP không chỉ đóng vai trò hỗ trợ tăng trưởng mà còn góp phần nâng cao khả năng thích nghi và sức sống của cây trồng trong điều kiện canh tác thực tế.

### 3.1.4. Cải thiện đất và quản lý nước

Bên cạnh việc sử dụng phân bón nano nhằm đảm bảo an ninh lương thực, việc phát triển nền nông nghiệp bền vững không còn là lựa chọn mà đã trở thành yêu cầu tất yếu. Việc cải thiện chất lượng đất nông nghiệp đóng vai trò quan trọng. Với kích thước siêu nhỏ, các hạt nano có thể tương tác với đất và cây trồng ở cấp độ phân tử, mang lại hiệu quả vượt trội so với các phương pháp truyền thống (El-Sayed et al., 2025). Các nghiên cứu gần đây đã cho thấy công nghệ nano có tiềm năng cao trong xử lý và cải tạo đất qua ba hướng chính. (i) Hấp phụ (Adsorption) sử dụng nano hydroxyapatite (nHAP) cố định chì (Pb) làm giảm hấp thụ Pb của thực vật trong đất bị ô nhiễm; (ii) Xúc tác (Catalysis) hạt nano gốc Fe thúc đẩy xúc tác oxy hóa nâng cao giúp làm sạch đất ô nhiễm; (iii) Xử lý sinh học (Bioremediation Enhancement) kết hợp vật liệu nano với vi sinh vật thông qua enzyme và chất hoạt động bề mặt giúp thúc đẩy quá trình xử lý chất ô nhiễm (El-Sayed et al., 2025).

Trong hoạt động canh tác, kiểm soát và quản lý nước đóng vai trò then chốt. Trong những năm gần đây, công nghệ tưới nhỏ giọt được xem là giải pháp hiện đại, hiệu quả nhất hiện nay, với khả năng cung cấp nước và chất dinh dưỡng trực tiếp đến vùng rễ cây, giúp tối ưu hóa sử dụng tài nguyên và giảm tới 80% lượng nước so với các hệ thống truyền thống (El-Sayed et al., 2025). Theo xu hướng ứng dụng nano, các hệ thống tưới nano được chia thành hai dạng chính: tưới bằng lỗ nano và bong bóng micro/nano (MNB). (i) Hệ thống Moistube sử dụng màng bán thấm cho phép nước thấm ra theo thế năng của đất, không sử dụng lực cơ học, giúp tiết kiệm tới 95% năng lượng và hiệu quả (Dirwai et al., 2021); (ii) Công nghệ tưới MNB, xục khí giúp bong bóng cực nhỏ chứa oxy từ từ vào đất, giúp tăng oxy hòa tan, kích thích hệ vi sinh có lợi, cải thiện khả năng hấp thu dinh dưỡng và độ phì nhiêu. Nhờ đó, năng suất cây trồng được cải thiện và nguy cơ tắc nghẽn đầu tưới cũng được giảm thiểu (Zhou et al., 2019).

## 3.2. Trong chăn nuôi

### 3.2.1. Cải thiện chất lượng thức ăn chăn nuôi

Công nghệ sinh học đã góp phần quan trọng trong cải tiến ngành sản xuất thức ăn chăn nuôi, tuy nhiên, hiện nay công nghệ nano đang mở ra một kỷ nguyên mới với những đột phá đáng kể. Không chỉ đơn thuần là việc thu nhỏ kích thước vật liệu, công nghệ nano còn làm thay đổi cách vật nuôi hấp thu và sử dụng dưỡng chất, từ đó nâng cao hiệu quả sinh trưởng và sức khỏe. Trong chăn nuôi thủy sản, một số vật liệu nano như nano bạc (AgNPs), nano vàng

(AuNPs) và nano oxit kẽm (ZnONPs) đã được sử dụng phổ biến (Hà và ctv., 2022). Đặc biệt, nghiên cứu của Jin et al. (2024) cho thấy khi quan sát dưới kính hiển vi điện tử, AgNPs gây tổn thương nghiêm trọng đến màng tế bào của vi khuẩn *S. typhimurium*. Cơ chế tác động kháng khuẩn của các hạt nano bạc (AgNPs) hiện vẫn đang được nghiên cứu, tuy nhiên nhiều bằng chứng cho thấy AgNPs tiêu diệt vi khuẩn thông qua sự kết hợp của nhiều cơ chế sinh hóa và vật lý học. Các hạt AgNPs có khả năng bám lên bề mặt tế bào vi khuẩn nhờ lực tĩnh điện giữa bạc mang điện tích dương và các nhóm chức âm trên lớp phospholipid của màng tế bào. Sự tương tác này làm phá vỡ cấu trúc lipid kép, làm thay đổi tính thấm của màng và gây rò rỉ các thành phần nội bào. Sau đó, AgNPs có thể xâm nhập vào bên trong tế bào vi khuẩn, tập trung tại vùng màng và thành tế bào. Tại đây, các hạt nano giải phóng ion bạc ( $Ag^+$ ), vốn có khả năng khuếch tán qua màng bị tổn thương và liên kết với nhóm -SH trên các protein màng và enzyme nội bào. Sự liên kết này gây biến tính protein, ức chế hoạt động của enzyme, rối loạn cân bằng ion và phá vỡ chức năng sống cơ bản của tế bào. Bên cạnh đó, AgNPs còn kích thích quá trình tạo ra các loại oxy phản ứng (ROS), gây ra stress oxy hóa. ROS là tác nhân gây tổn thương DNA, protein và lipid màng, dẫn đến rối loạn nghiêm trọng trong hoạt động chuyên hóa và cấu trúc tế bào. Các tác động dẫn đến sự suy giảm nhanh chóng của chức năng sinh lý của vi khuẩn. Màng tế bào trở nên mỏng, bị biến dạng, mất tính toàn vẹn và cuối cùng tế bào bị phá vỡ hoàn toàn (Siritongsuk et al., 2016; Mikhailova, 2024).

Đối với gia cầm, nghiên cứu của Lestari et al. (2025) đã chứng minh rằng phụ gia từ lá sambiloto và moringa dưới dạng hạt nano lỏng giúp ổn định phản ứng sinh lý và được xem là phương pháp bổ sung tối ưu. Trong chăn nuôi lợn, các khoáng vi lượng như Cu, Fe, Mn, Ni và Zn là cần thiết cho sự phát triển, nhưng có thể gây độc nếu bổ sung quá mức. Khi được sử dụng ở dạng nano, các khoáng này không chỉ dễ hấp thu hơn mà còn giúp cải thiện tốc độ tăng trưởng, giảm lượng thức ăn tiêu tốn trên mỗi đơn vị tăng trọng, đồng thời hạn chế tích lũy kim loại trong gan (Hoàng, 2020). Tổng hợp các nghiên cứu trên cho thấy, công nghệ nano không chỉ nâng cao hiệu quả sử dụng thức ăn và sức khỏe vật nuôi, mà còn góp phần hướng tới một nền chăn nuôi an toàn và bền vững hơn trong tương lai

### 3.2.2. Ứng dụng vật liệu nano có tính kháng khuẩn

Trong chăn nuôi công nghiệp hiện đại, vấn đề kháng kháng sinh và tồn dư thuốc trong thực phẩm

đang trở thành mối lo ngại nghiêm trọng đối với sức khỏe cộng đồng. Việc lạm dụng kháng sinh không chỉ ảnh hưởng đến chất lượng sản phẩm mà còn góp phần làm gia tăng các chủng vi khuẩn đa kháng thuốc (Gong et al., 2007). Trước thực trạng đó, công nghệ nano, đặc biệt là các vật liệu có tính kháng khuẩn như nano bạc (AgNPs), nano đồng (CuNPs), và nano oxit kẽm (ZnO-NPs), đang nổi lên như một giải pháp thay thế. Các hạt nano này có thể tiêu diệt vi khuẩn qua nhiều cơ chế như: phá hủy cấu trúc màng tế bào, gây stress oxy hóa nội bào, ức chế quá trình tổng hợp protein của vi khuẩn, từ đó làm giảm khả năng kháng thuốc (Rai et al., 2009).

Không chỉ được sử dụng trong điều trị bệnh, nano kháng sinh còn được ứng dụng để vệ sinh chuồng trại và bổ sung vào khẩu phần ăn nhằm tăng sức đề kháng và năng suất vật nuôi. Một số nghiên cứu chỉ ra rằng các hạt nano bạc (AgNPs) có hiệu quả trong điều trị viêm vú ở bò sữa, căn bệnh phổ biến do *Staphylococcus aureus* và *Escherichia coli* gây ra. Các nghiên cứu in vitro cho thấy AgNPs có thể phá vỡ màng sinh học và tiêu diệt hiệu quả các vi sinh vật gây bệnh (El-Aziz et al., 2021; Lange et al., 2021). Ngoài ra, hạt nano oxit kẽm (ZnO-NPs) cũng thể hiện hiệu quả tương tự. Nano chitosan (NQO), có nguồn gốc từ chitin, cũng được nghiên cứu như một giải pháp thay thế kháng sinh nhờ đặc tính kháng khuẩn và khả năng ngăn chặn hình thành màng sinh học (Aguayo et al., 2020).

Bên cạnh đó, Hạt nano  $Fe_3O_4@Ag$  được tổng hợp bằng cách khử bạc nitrat trên bề mặt hạt  $Fe_3O_4$ , tạo thành cấu trúc lõi-vỏ (core-shell hybrid). Trong đó, lõi  $Fe_3O_4$  có tính siêu từ tính giúp các hạt dễ dàng thu hồi bằng từ trường, còn lớp vỏ bạc (Ag) mang đặc tính kháng khuẩn mạnh. Sự kết hợp này vừa nâng cao hiệu quả xử lý vừa cho phép hạt nano tái sử dụng nhiều lần. Nghiên cứu cũng đã chứng minh rằng  $Fe_3O_4@Ag$  có khả năng tiêu diệt hiệu quả các vi khuẩn *Staphylococcus epidermidis*, *Bacillus subtilis* và *Escherichia coli* (Gong et al., 2007). Nhờ đó, loại hạt nano này thể hiện tiềm năng lớn trong lĩnh vực chăn nuôi, có thể được ứng dụng như một tác nhân kháng khuẩn thay thế kháng sinh truyền thống, góp phần nâng cao tính bền vững và an toàn sinh học trong sản xuất chăn nuôi.

### 3.2.3. Nano probiotic

Kháng sinh đóng vai trò quan trọng trong phòng ngừa và điều trị cũng như trong sự phát triển ổn định và bền vững của ngành chăn nuôi gia súc. Việc lạm dụng kháng sinh và hệ quả đã được đề cập phía trên, thay vào đó các nhà nghiên cứu đã sử dụng men vi sinh (Probiotics) (*Staphylococcus succinus*,

*Enterococcus faecium*, *Lactobacilli salivarius* và *Lactobacilli agilis*) (Wang & Chen, 2021) tác dụng có lợi như tăng cân cho vật nuôi, phát triển hệ vi khuẩn đường ruột có lợi và tăng cường hệ thống miễn dịch trong trang trại (Ren et al., 2019).

Một nghiên cứu mới hiện nay của Xing et al. (2025) đã phát triển hệ LGG@P@Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, trong đó hạt nano Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> được gắn lên tế bào *Lactocaseibacillus rhamnosus* GG thông qua lớp phủ polydopamine. Nhờ tính siêu từ của Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, probiotics có thể được điều khiển và tập trung tại ruột bằng từ trường bên ngoài, giúp tăng khả năng sống sót trong môi trường tiêu hóa và nâng cao hiệu quả điều trị.

Đúc kết lại, công nghệ nano đang thúc đẩy nông nghiệp phát triển bền vững, từ tăng năng suất cây trồng đến nâng cao chất lượng chăn nuôi. Tuy nhiên, để ứng dụng rộng rãi, cần thêm nghiên cứu về độ ổn định, an toàn và hiệu quả thực tiễn.

### 3.3. Thách thức và triển vọng của vật liệu nano

#### 3.3.1. Thách thức

Một trong những mối quan ngại lớn nhất là vấn đề an toàn thực phẩm và sức khỏe con người khi sử dụng hạt nano kim loại như nano bạc, nano đồng hoặc nano oxit titan. Các hạt này có kích thước siêu nhỏ, khả năng xuyên qua hàng rào tế bào và có thể tích tụ sinh học trong các mô thực vật hoặc động vật. Việc tích tụ các hạt nano trong sản phẩm nông nghiệp có thể gây nguy cơ độc tính tiềm ẩn đối với người tiêu dùng nếu không được kiểm soát nghiêm ngặt. Theo nghiên cứu của Shah et al. (2024) khả năng độc hại tiềm ẩn của vật liệu nano kỹ thuật (ENM) vẫn là mối quan ngại vì chúng có thể tích tụ trong chuỗi thức ăn và gây ra rủi ro cho sức khỏe con người và môi trường nếu không được đánh giá đúng mức. Nghiên cứu của Simonin et al. (2018) cho thấy nồng độ CuO-NPs trong đất lớn hơn hoặc bằng 100 mg/kg đã gây ra tác động mạnh mẽ đến hoạt động của vi sinh vật liên quan đến chu trình cacbon và nitơ (hô hấp đất, nitrat hóa, khử nitơ), đặc biệt đối với các loại đất có hàm lượng chất hữu cơ thấp. Hơn thế nữa, khi giun đất *Enchytraeus crypticus* bị phơi nhiễm CuO-NPs trong 21 ngày thì cộng đồng vi sinh vật trong ruột giun giảm đáng kể, đồng thời ảnh hưởng đến trọng lượng và khả năng sinh sản của chúng (Ma et al., 2020).

Ngoài ra, các phương pháp đánh giá độc tính hiện vẫn còn hạn chế, thiếu tiêu chuẩn hóa về liều lượng an toàn, phương thức ứng dụng và quy định pháp lý quốc tế. Sekhon (2014) cũng lưu ý rằng: “Có

nhu cầu cấp thiết về các khuôn khổ quản lý hài hòa và các nghiên cứu độc tính dài hạn của vật liệu nano được ứng dụng trong các lĩnh vực nông nghiệp thực phẩm” (Sekhon, 2014, p.45).

Chi phí sản xuất vật liệu nano và thiết bị liên quan còn cao, đặc biệt khi yêu cầu công nghệ cao và kiểm soát quy trình nghiêm ngặt. Điều này khiến công nghệ nano chưa thể phổ biến rộng rãi tại các nước đang phát triển, hoặc với nông dân quy mô nhỏ. Chi phí sản xuất cao, thiếu cơ sở hạ tầng quy mô lớn và khả năng tiếp cận đào tạo hạn chế khiến cho những người nông dân quy mô nhỏ gặp khó khăn trong việc áp dụng các giải pháp dựa trên công nghệ nano. Nhận thức xã hội cũng là một rào cản lớn. Tâm lý e ngại của người tiêu dùng đối với các sản phẩm liên quan đến nano vẫn tồn tại, do thiếu thông tin minh bạch và hiểu biết về công nghệ này. Điều này dẫn đến rủi ro về thị trường tiêu thụ, đặc biệt với các sản phẩm xuất khẩu.

#### 3.3.2. Triển vọng và hướng nghiên cứu khắc phục

Trước những lo ngại về an toàn sức khỏe con người, xu hướng phát triển công nghệ nano trên bề mặt sản phẩm ngày càng được chú trọng. Trong bảo quản nông sản, đã có nhiều hướng nghiên cứu và giải pháp khắc phục khả thi hơn. Trước hết, xu hướng phát triển đang hướng mạnh đến các vật liệu nano có nguồn gốc sinh học, phân hủy sinh học và an toàn với sức khỏe, chẳng hạn như nano chitosan, nano cellulose hoặc nano silica sinh học, thay thế cho các hạt kim loại truyền thống. Theo Aguayo et al. (2020), các vật liệu nano có nguồn gốc sinh học và phân hủy sinh học như nanochitosan đang được chú ý như những giải pháp thay thế an toàn hơn do độc tính thấp hơn và tác động đến môi trường.

Bên cạnh đó, các nhà khoa học cũng đang đẩy mạnh nghiên cứu về nano mang chức năng kép (kháng khuẩn và cảm biến), nhằm tăng hiệu quả và tối ưu hóa chi phí. Việc thiết kế các hệ nano tích hợp thông minh - vừa bảo quản, vừa giám sát chất lượng nông sản theo thời gian thực - là một hướng đi đầy tiềm năng.

Về mặt chính sách và ứng dụng thực tiễn, các tổ chức như FAO đã khuyến nghị cần có sự hỗ trợ mạnh mẽ từ phía chính phủ thông qua chuyển giao công nghệ, đào tạo nhân lực và hỗ trợ tài chính, đặc biệt ở các nước đang phát triển: “Việc tăng cường quan hệ đối tác công tư và thúc đẩy các công ty khởi nghiệp công nghệ nông nghiệp ứng dụng công nghệ nano có thể đẩy nhanh quá trình chuyển giao công

nghe và áp dụng bền vững ở cấp độ trang trại” (FAO & ITU, 2022, p. 28).

Tại Việt Nam, nhiều hướng nghiên cứu về ứng dụng công nghệ nano trong nông nghiệp cũng đã được tiến hành. Một nghiên cứu về ảnh hưởng của nano coban đến sự nảy mầm và đặc tính sinh học của cây đậu tương (*Glycine max* L. Merr) DT96. Với nồng độ nano coban 0,33 mg/kg hạt giống đã cho kết quả nảy mầm tốt lên đến 93,03%. Các chỉ tiêu về chiều cao thân, chiều dài rễ, khối lượng khô của thân rễ cũng cao hơn so với đối chứng (Hiền và ctv., 2022). Theo nghiên cứu của Trường và ctv. (2024) đã tổng hợp vật liệu nano CeO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>-NPs từ tiền chất Ce(NO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> và tro trấu dùng làm chất kích thích sinh trưởng cho cây ớt chuông. Kết quả cho thấy có sự tác động đáng kể đến quá trình sinh trưởng của cây, giúp cho năng suất ớt tăng 22 tấn/ha, chiều dài rễ trung bình tăng 3,6 cm và thời gian thu hoạch rút ngắn hơn 11 ngày. Hạt nano ZnO-NPs được sử dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực như y học và điện tử, hơn thế chúng còn có tiềm năng lớn trong ứng dụng làm phân bón trong canh tác nông nghiệp. Việc sử dụng ZnO-NPs trong đánh giá sự nảy mầm của hạt cây dẻ (*Castanea mollissima*) cho thấy cải thiện đáng kể quá trình nảy mầm của hạt và sự phát triển nhanh của rễ cây với nồng độ ZnO-NPs là 1000 ppm (Nam và ctv., 2025).

Tóm lại, việc ứng dụng công nghệ nano trong nông nghiệp hay bất kỳ lĩnh vực nào cũng cần đòi hỏi một cách tiếp cận toàn diện, từ nghiên cứu khoa học cơ bản, kiểm định an toàn đến chính sách triển

khai thực tiễn. Nếu các thách thức được giải quyết đúng hướng, công nghệ nano hứa hẹn sẽ đóng vai trò then chốt trong nông nghiệp hiện đại, góp phần nâng cao chất lượng, kéo dài tuổi thọ nông sản và hướng tới một nền nông nghiệp xanh, thông minh và bền vững.

#### 4. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Công nghệ nano đang dần khẳng định vai trò quan trọng trong việc đổi mới mô hình sản xuất nông nghiệp theo hướng hiện đại, thông minh và bền vững. Với kích thước siêu nhỏ và tính chất bề mặt đặc biệt, các vật liệu nano có khả năng tác động sâu rộng từ cấp độ tế bào đến hệ sinh thái, giúp nâng cao hiệu quả sử dụng đầu vào, cải thiện chất lượng nông sản, đồng thời hạn chế tác động tiêu cực đến môi trường. Tuy nhiên, việc ứng dụng công nghệ nano trong nông nghiệp vẫn đối mặt với nhiều thách thức, đặc biệt là nguy cơ tích tụ sinh học của hạt nano kim loại trong thực phẩm và môi trường nếu không được kiểm soát nghiêm ngặt. Chính vì thế cần tăng cường đầu tư hơn nữa vào nghiên cứu công nghệ nano trong nông nghiệp tại Việt Nam, với trọng tâm là đánh giá tính an toàn sinh học, cơ chế tương tác giữa hạt nano và hệ sinh thái nông nghiệp, cũng như hiệu quả kinh tế - xã hội của từng ứng dụng. Ban hành các quy chuẩn và hướng dẫn kỹ thuật về an toàn trong sản xuất, sử dụng và quản lý vật liệu nano một cách chặt chẽ. Điều này góp phần khai thác tối đa tiềm năng ứng dụng của công nghệ này trong tương lai.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Aguayo, R. P., Larenas, B. T., Godoy, A. C., Rivas, B., González-Casanova, J., Rojas-Gómez, D., & Fuentes, C. N. (2020). Antimicrobial and antibiofilm capacity of chitosan nanoparticles against wild type strain of *Pseudomonas* sp. isolated from milk of cows diagnosed with bovine mastitis. *Antibiotics*, 9(9), 551. <https://doi.org/10.3390/antibiotics9090551>
- Ahari, H., Jafari, A., Ozdal, T., Moradi, S., Bahari, H. R., Wu, Q., Eş, I., & Khaneghah, A. M. (2025). Recent innovations in metal-based nanoparticles for food packaging: A focus on safety and environmental impact. *Applied Food Research*, 5(1), 100860. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.100860>
- Anvar, A. A., Ahari, H., & Ataee, M. (2021). Antimicrobial properties of food nanopackaging: A new focus on foodborne pathogens. *Frontiers in Microbiology*, 12, 690706. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.690706>
- Barage, S., Lakkakula, J., Sharma, A., Roy, A., Alghamdi, S., Almeahadi, M., & Hossain, M. J. (2022). Nanomaterial in food packaging: A comprehensive review. *Journal of Nanomaterials*, 2022, 6053922. <https://doi.org/10.1155/2022/6053922>
- Bhanuprakash, H. R., Sapkal, D. R., Hanumanthappa, M., Rajath, H. P., Pandey, S., Navinkumar, Vishwanth, V. E., & Soumya, K. (2023). Nanotechnology in agriculture for improving crop yield: A review. *Journal of Food Chemistry and Nanotechnology*, 9(1), 420- 428. <https://doi.org/10.17756/jfcn.2023-s1-053>
- Dirwai, T. L., Mabhaudhi, T., Kanda, E. K., & Senzanje, A. (2021). Moisture irrigation technology development, adoption and future prospects: A systematic scoping review. *Heliyon*, 7(2), e06213. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06213>
- El-Aziz, A. N. K., Ammar, A. M., El-Naenaeey, E. S. Y., Damaty, E. H. M., Elazazy, A. A., Hefny,

- A. A., Shaker, A., & Eldesoukey, I. E. (2021). Antimicrobial and antibiofilm potentials of cinnamon oil and silver nanoparticles against *Streptococcus agalactiae* isolated from bovine mastitis: new avenues for countering resistance. *BMC veterinary research*, *17*, 1-14. <https://doi.org/10.1186/s12917-021-02842-9>
- El-Enain, A. I. M., Elqady, E. M., El-Said, E., Salem, H. H., Badr, N. F., Abd-Allah, G. E., & Rezk, M. M. (2023). Biosynthesized silver nanoparticles (AgNPs) from isolated actinomycetes strains and their impact on the black cutworm, *agrotis ipsilon*. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, *194*, 105492. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2023.105492>
- El-Sayed, M., Ayoub, H. A., Helal, M., Sang, W., Shen, Z., & Abdelhafeez, I. A. (2025). Nanotechnology-enabled soil management for sustainable agriculture: interactions, challenges, and prospective. *Environmental Science: Nano*, *12*, 2128-2153. <https://doi.org/10.1039/D4EN00943F>
- El-Shenawy, F. A., El-Sherbeny, E. M., & Kassem, S. (2023). Efficacy of zinc oxide and copper oxide nanoparticles on virulence genes of avian pathogenic *E. coli* (APEC) in broilers. *BMC Veterinary Research*, *19*, 108. <https://doi.org/10.1186/s12917-023-03643-y>
- European Food Safety Authority. (2025). *Pesticides*. EFSA - European Union. <https://www.efsa.europa.eu/en/topics/topic/pesticides>
- FAO & ITU. (2022). *E-agriculture in action: Blockchain for agriculture - Opportunities and challenges*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Gangadoo, S., Dinev, I., Willson, N. L., Moore, R. J., Chapman, J., & Stanley, D. (2020). Nanoparticles of selenium as high bioavailable and non-toxic supplement alternatives for broiler chickens. *Environmental science and pollution research international*, *27*(14), 16159-16166. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07962-7>
- Gong, P., Li, H., He, X., Wang, K., Hu, J., Tan, W., Zhang, S., & Yang, X. (2007). Preparation and antibacterial activity of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@Ag nanoparticles. *Nanotechnology*, *18*(28), 285604. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/18/28/285604>
- Grün, A. L., & Emmerling, C. (2018). Long-term effects of environmentally relevant concentrations of silver nanoparticles on major soil bacterial phyla of a loamy soil. *Environmental Sciences Europe*, *30*(1), 31. <https://doi.org/10.1186/s12302-018-0160-2>
- Gupta, A., Rayeen, F., Mishra, R., & Tripathi, M. (2023). Nanotechnology applications in sustainable agriculture: An emerging eco-friendly approach. *Plant Nano Biology*, *4*(2023), 100033. <https://doi.org/10.1016/j.plana.2023.100033>
- Hà, P. T. H., Cường, T. K., & Luân, N. T. (2022). Tiềm năng sử dụng vật liệu nano để kiểm soát vi khuẩn gây bệnh trong nuôi trồng thủy sản. *Tạp chí Khoa học kỹ thuật Thú y*, *29*(1), 92-97. <https://vjol.info.vn/index.php/kk-ty/article/view/81017>
- Hiền, P. T. T., Chính, H. Đ., Thu, P. P., Thảo, Đ. T., Thủy, B. T., Chiền, H. Đ., Mai, K. T. H., & Đình, N. V. (2022). Bước đầu nghiên cứu ảnh hưởng của nano coban đến một số đặc tính nông sinh học của giống Đậu tương DT96 trồng tại Vĩnh Phúc. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Việt Nam*, *64*(7), 44-48. [https://doi.org/10.31276/VJST.64\(7\).44-48](https://doi.org/10.31276/VJST.64(7).44-48)
- Hoang, N. S. (2020). Effects of nano mineral-supplemented diet on pig growth. *Journal of Biology*, *42*(1), 125. <https://doi.org/10.15625/0866-7160/v42n1.14863>
- Ingle, P. U., Shende, S. S., Shingote, P. R., Mishra, S. S., Sarda, V., Wasule, D. L., Rajput, V. D., Minkina, T., Rai, M., Sushkova, S., Mandzhieva, S., & Gade, A. (2022). Chitosan nanoparticles (ChNPs): A versatile growth promoter in modern agricultural production. *Heliyon*, *8*(11), e11893. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11893>
- Jin, X., Peng, N., Cui, A., Liu, Y., Peng, X., Huang, L., Ed-Dra, A., He, F., Li, Y., Yang, S., & Yue, M. (2024). Sodium dodecyl sulfate-coated silver nanoparticles accelerate antimicrobial potentials by targeting amphiphilic membranes. *mLife*, *3*(4), 551-564. <https://doi.org/10.1002/mlf2.12143>
- Lange, A., Grzenia, A., Wierzbicki, M., Strojny-Cieslak, B., Kalińska, A., Gołębiewski, M., Radzikowski, D., Sawosz, E., & Jaworski, S. (2021). Silver and copper nanoparticles inhibit biofilm formation by mastitis pathogens. *Animals: An open access journal from MDPI*, *11*(7), 1884. <https://doi.org/10.3390/ani11071884>
- Lestari, S. D., Hamiyati, A. A., Nuningtyas, Y. F., Hermanto, F. E., Marwi, F., & Natsir, M. H. (2025). The effects different form of feed additive from combination of sambilotto and moringa leaves on physiological respons of broiler. *Proceedings of the 5th International Conference on Environmentally Sustainable Animal Industry (ICESAI 2024)*, 553-560. [https://doi.org/10.2991/978-94-6463-670-3\\_58](https://doi.org/10.2991/978-94-6463-670-3_58)
- Ma, J., Chen, Q. L., O'Connor, P., & Sheng, G. D. (2020). Does soil CuO nanoparticles pollution alter the gut microbiota and resistome of *Enchytraeus crypticus*?. *Environmental pollution*

- (*Barking, Essex: 1987*), 256, 113463.  
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113463>
- Mahmud, M. N., Muniza, N. T., & Raidah, R. (2025). Nano fertilizer: A revolution in precision agriculture and crop productivity. *Big Data in Agriculture*, 7(2), 39-49.  
<http://doi.org/10.26480/bda.02.2025.39.49>
- Mariyam, S., Upadhyay, S. K., Chakraborty, K., Verma, K. K., Duhan, J. S., Muneer, S., Meena, M., Sharma, R. K., Ghodake, G., & Seth, C. S. (2024). Nanotechnology, a frontier in agricultural science, a novel approach in abiotic stress management and convergence with new age medicine-A review. *The Science of the total environment*, 912, 169097.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169097>
- Mekuye, B., & Abera, B. (2023). Nanomaterials classification, synthesis methods, and applications: A comprehensive review. *Nano Select*, 4(4), 486-507.  
<https://doi.org/10.1002/nano.202300038>
- Meng, X., Zhou, J., & Li, H. (2025). Application of nanotechnology in agricultural sustainability: Absorption, translocation, and challenges of nanoparticles. *Journal of Plant Nutrition*, 48(2), 120-135.  
<https://doi.org/10.1016/j.cpb.2025.100492>
- Mikhailova, E. O. (2024). Green silver nanoparticles: An antibacterial mechanism. *Antibiotics (Basel, Switzerland)*, 14(1), 5.  
<https://doi.org/10.3390/antibiotics14010005>
- Nam, N. G., Binh, N. T., Ly, T. T. K., & Thành, N. M. (2025). Tổng hợp nano zinc oxide bằng phương pháp thủy nhiệt và ảnh hưởng của nó đến khả năng nảy mầm hạt giống cây dẻ (*Castanea mollissima*). *Tạp chí Khoa học Đại học Huế*, 134(1A), 31-41  
<https://doi.org/10.26459/hueunijns.v134i1A.7684>
- Neme, G., Tesfaye, K., & Gebremichael, D. (2021). Application of nanotechnology in agriculture, postharvest loss reduction and food processing: Food security implication and challenges. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(6), e15809.  
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08539>
- Rai, M., Yadav, A., & Gade, A. (2009). Silver nanoparticles as a new generation of antimicrobials. *Biotechnology Advances*, 27(1), 76-83.  
<https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2008.09.002>
- Ren, H., Zentek, J., & Vahjen, W. (2019). Optimization of production parameters for probiotic *Lactobacillus* strains as feed additive. *Molecules*, 24(18), 3286.  
<https://doi.org/10.3390/molecules24183286>
- Sands, R., Meade, B., Seale, J. L., Robinson, S., & Seeger, R. (2023). Scenarios of global food consumption: Implications for agriculture (Report No. ERR-323). *U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service*, 1-52.  
<https://doi.org/10.32747/2023.8134356.ers>
- Sekhon, B. S. (2014). Nanotechnology in agri-food production: an overview. *Nanotechnology, science and applications*, 7, 31-53.  
<https://doi.org/10.2147/NSA.S39406>
- Shah, M. A., Shahnaz, T., Zehab-ud-Din, M., Masoodi, J. H., Nazir, S., Qurashi, A., & Ahmed, G. H. (2024). Application of nanotechnology in the agricultural and food processing industries: A review. *Sustainable Materials and Technologies*, 39, e00809.  
<https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00809>
- Shandila, P., Mahatmanto, T., & Hsu, J. L. (2025). Metal-based nanoparticles as nanopesticides: Opportunities and challenges for sustainable crop protection. *Processes*, 13(5), 1278.  
<https://doi.org/10.3390/pr13051278>
- Simonin, M., Cantarel, A. A. M., Crouzet, A., Gervais, J., Martins, J. M. F., & Richaume, A. (2018). Negative effects of copper oxide nanoparticles on carbon and nitrogen cycle microbial activities in contrasting agricultural soils and in presence of plants. *Frontiers in microbiology*, 9, 3102.  
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.03102>
- Siritongsuk, P., Hongsing, N., Thammawithan, S., Daduang, S., Klaynongsruang, S., Tuanyok, A., & Patramanon, R. (2016). Two-phase bactericidal mechanism of silver nanoparticles against *Burkholderia pseudomallei*. *PloS one*, 11(12), e0168098.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0168098>
- Subramanian, K. S., Manikandan, A., Thirunavukkarasu, M., & Rahale, C. S. (2015). Nano-fertilizers for balanced crop nutrition. *Nanotechnologies in food and agriculture*, 69-80. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-14024-7\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-14024-7_3)
- Thu, H. E., Haider, M. A., Khan, S., Sohail, M., & Hussain, Z. (2023). Nanotoxicity induced by nanomaterials: A review of factors affecting nanotoxicity and possible adaptations. *OpenNano*, 14, Article 100190.  
<https://doi.org/10.1016/j.onano.2023.100190>
- Trương, H. X., Trung, N. V., Nhi, N. T., Ngân, P. T., Linh, Đ. T. D., Hương, L. T. T., & Hoàng, C. V. (2024). Tổng hợp vật liệu nano trên cơ sở tro trấu và CeO<sub>2</sub> ứng dụng làm chất kích thích sinh trưởng cho cây ớt chuông (*Capsicum annum* L.). *Tạp chí Khoa học Đại học Huế*, 133(1C), 171-178.  
<https://doi.org/10.26459/hueunijns.v133i1C.7455>
- Upadhyay, P. K., Singh, V. K., Rajanna, G. A., Dwivedi, B. S., Dey, A., Rathore, S. S., Shekhawat, K., Babu, S., Singh, T., Kumar, Y.,

- Singh, C., Rangot, M., Kumar, A., Sarkar, S., Dash, S., & Rawat, S. (2023). Unveiling the combined effect of nano fertilizers and conventional fertilizers on crop productivity, profitability, and soil well-being. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, 1260178. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1260178>
- Vaidya, S., Deng, C., Wang, Y., Zuverza-Mena, N., Dimkpa, C., & White, J. C. (2024). Nanotechnology in agriculture: A solution to global food insecurity in a changing climate?. *NanoImpact*, 34, 100502. <https://doi.org/10.1016/j.impact.2024.100502>
- Van, S. N., Minh, H. D., & Anh, D. N. (2013). Study on chitosan nanoparticles on biophysical characteristics and growth of Robusta coffee in green house. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2(4), 289-294. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2013.06.001>
- Verma, K. K., Song, X. P., Joshi, A., Tian, D. D., Rajput, V. D., Singh, M., Arora, J., Minkina, T., & Li, Y. R. (2022). Recent trends in nano-fertilizers for sustainable agriculture under climate change for global food security. *Nanomaterials*, 12(1), 173. <https://doi.org/10.3390/nano12010173>
- Vijayakumar, S., Renganathan, S., & Arumugam, S. (2022). Evolution and recent scenario of nanotechnology in agriculture and food industries. *Nanotechnology Reviews*, 11(1), 94-110. <https://doi.org/10.1155/2022/1280411>
- Wang, J., & Chen, L. (2021). Impact of a novel nano-protectant on the viability of probiotic bacterium *Lactobacillus casei* K17. *Foods*, 10(3), 529. <https://doi.org/10.3390/foods10030529>
- Xing, H., Liu, X., Wang, J., Zhou, T., Jin, X., Qiu, R., Lu, Y., Liu, C., & Song, Y. (2025). Magnetically targeted delivery of probiotics for controlled residence and accumulation in the intestine. *Nanoscale*, 17(14), 8588-8598. <https://doi.org/10.1039/D4NR04753B>
- Yang, J., Xiong, D., & Long, M. (2025). Zinc oxide nanoparticles as next-generation feed additives: bridging antimicrobial efficacy, growth promotion, and sustainable strategies in animal nutrition. *Nanomaterials*, 15(13), 1030. <https://doi.org/10.3390/nano15131030>
- Zhou, Y., Zhou, B., Xu, F., Muhammad, T., & Li, Y. (2019). Appropriate dissolved oxygen concentration and application stage of micro-nano bubble water oxygenation in greenhouse crop plantation. *Agricultural Water Management*, 223, 105713. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105713>