

Xu hướng ứng dụng hạt nano silica trong bảo vệ thực vật hướng đến canh tác bền vững

Trần Đăng Khoa¹, Đồng Huy Giới², La Việt Hồng³, Chu Đức Hà^{1*}

¹Trường Đại học Công nghệ, Đại học Quốc gia Hà Nội

²Học viện Nông nghiệp Việt Nam

³Trường Đại học Sư phạm Hà Nội 2

Potential utilization of silica nanoparticles in plant protection toward sustainable crop production

Tran Dang Khoa¹, Dong Huy Gioi², La Viet Hong³, Chu Duc Ha^{1*}

¹University of Engineering and Technology, Vietnam National University Hanoi

²Vietnam National University of Agriculture

³Hanoi Pedagogical University 2

*Corresponding author: cd.ha@vnu.edu.vn

<https://doi.org/10.55250/jo.vnuf.14.2.2025.031-041>

TÓM TẮT

Nghiên cứu này tập trung vào việc khai thác tiềm năng ứng dụng của hạt nano silica (SiNP) trong bảo vệ thực vật, với mục tiêu cải thiện hiệu quả kiểm soát sâu, bệnh hại và tăng cường sức đề kháng của cây trồng. SiNP được tổng hợp thông qua các phương pháp truyền thống như sol-gel, Stöber, ngưng tụ hơi hóa học và các quy trình tổng hợp xanh thân thiện môi trường, cho phép điều chỉnh kích thước, cấu trúc và tính chất vật liệu. Với vai trò như một chất mang hiệu quả, SiNP hỗ trợ lưu giữ và giải phóng có kiểm soát thuốc bảo vệ thực vật dựa trên các yếu tố kích hoạt như pH, enzyme, và nhiệt độ, giúp kéo dài hiệu quả bảo vệ, giảm thất thoát và dư lượng hóa chất trong môi trường. Ngoài ra, SiNP thể hiện khả năng kháng nấm bệnh, vi khuẩn, và sâu hại thông qua việc điều chỉnh hệ thống phòng vệ sinh lý và phân tử của cây, như tăng cường hoạt tính enzyme chống oxy hóa và điều hòa tín hiệu hormone thực vật. Tuy nhiên, các vấn đề liên quan đến tồn dư thuốc bảo vệ thực vật trong đất và tác động đến hệ sinh thái đất vẫn cần được nghiên cứu thêm để tối ưu hóa ứng dụng SiNP trong nông nghiệp. Nghiên cứu này phân tích xu hướng ứng dụng hạt nano silica trong bảo vệ thực vật, qua đó góp phần xây dựng giải pháp bền vững, giảm thiểu tác động tiêu cực đến môi trường và tăng cường hiệu quả sản xuất nông nghiệp trong bối cảnh biến đổi khí hậu và an toàn thực phẩm.

Thông tin chung:

Ngày nhận bài: 06/12/2024

Ngày phản biện: 08/01/2025

Ngày quyết định đăng: 11/02/2025

Từ khóa:

Bảo vệ thực vật, hạt nano silica, tác nhân gây bệnh, tổng hợp.

ABSTRACT

This study focuses on exploring the potential applications of silica nanoparticles (SiNPs) in crop protection, aiming to enhance pest control efficiency and improve plant resistance. SiNPs are synthesized through traditional methods such as sol-gel, Stöber, chemical vapor condensation, and environmentally friendly green synthesis processes, enabling precise control over particle size, structure, and material properties. As an effective carrier, SiNPs facilitate the encapsulation and controlled release of pesticides triggered by factors such as pH, enzymes, and temperature. This approach prolongs protection, reduces chemical losses, and minimizes environmental residues. Additionally, SiNPs exhibit antifungal, antibacterial, and insecticidal properties by modulating plant defense mechanisms at physiological and molecular levels, including enhanced antioxidant enzyme activity and regulation of plant hormone signaling. However, issues related to pesticide residues in soil and their impact on soil ecosystems require further investigation to optimize SiNP applications in agriculture. This study contributes to developing sustainable agricultural solutions, mitigating environmental impacts, and improving production efficiency in the context of climate change and food safety challenges.

Keywords:

Plant protection, pathogen, silica nanoparticle, synthesis.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Công nghệ nano, với khả năng thao tác và điều chỉnh vật liệu ở quy mô nguyên tử và phân tử (1-100 nm), đã tạo ra những bước đột phá trong nhiều lĩnh vực khoa học và công nghệ [1], bao gồm nông nghiệp [2-4]. Trong canh tác cây trồng, công nghệ nano mở ra cơ hội cải thiện hiệu suất sản xuất thông qua việc tối ưu hóa sự hấp thu dinh dưỡng [2], tăng cường khả năng chống chịu stress sinh học (như sâu bệnh) và stress phi sinh học (như hạn hán, nhiệt độ cao) [3], cũng như nâng cao chất lượng nông sản.

Các hạt nano (nano particle, NP) được ứng dụng để tạo ra phân bón thông minh, cho phép giải phóng chậm và kiểm soát lượng dinh dưỡng cung cấp cho cây trồng theo nhu cầu thực tế. Điều này không chỉ tăng hiệu quả sử dụng phân bón mà còn giảm thiểu ô nhiễm môi trường do dư lượng phân bón gây ra [3, 5]. NP cũng được sử dụng trong phát triển thuốc trừ sâu và thuốc diệt cỏ hiệu quả cao, bằng cách tăng cường khả năng xâm nhập và tác động trực tiếp lên mục tiêu gây hại. Đồng thời, NP giúp giảm liều lượng cần thiết và hạn chế ảnh hưởng đến các sinh vật không chủ đích [6]. Phân bón dựa trên công nghệ nano giúp cải thiện sự phân phối và hấp thu các vi chất dinh dưỡng khó hấp thu như sắt (Fe), kẽm (Zn) và mangan (Mn). Các NP mang vi chất này có thể xuyên qua màng tế bào thực vật hiệu quả, đảm bảo cung cấp đầy đủ dinh dưỡng cho quá trình sinh trưởng và phát triển của cây [2, 7]. Mặc dù NP kim loại như bạc (Ag), đồng (Cu) và Zn đã được chứng minh hiệu quả trong việc kiểm soát sâu bệnh và cung cấp vi chất dinh dưỡng, việc sử dụng chúng trong nông nghiệp đã đẩy lên những lo ngại về môi trường và sức khỏe con người.

Các NP kim loại này có khả năng tích lũy trong đất và sinh vật sống, do chúng không dễ dàng phân hủy trong môi trường tự nhiên. Khi được áp dụng trên đồng ruộng, NP kim loại có thể hấp thụ vào rễ cây và tích lũy trong các mô thực vật, từ đó xâm nhập vào chuỗi thức ăn khi con người và động vật tiêu thụ các sản phẩm nông nghiệp này [8]. Ngoài ra, chúng cũng có thể rửa trôi vào nguồn nước ngầm và mặt, ảnh hưởng đến chất lượng nước và hệ sinh thái

thủy sinh [8]. Sự tích lũy kim loại nặng trong môi trường và sinh vật gây tác động tiêu cực, như độc hại đối với vi sinh vật đất, ức chế quang hợp và giảm năng suất cây trồng. Nhiễm độc kim loại nặng có thể gây tổn thương hệ thần kinh, suy giảm chức năng gan, thận, rối loạn hormone và tăng nguy cơ ung thư. Kim loại nặng tích lũy lâu dài, gây hậu quả khó khắc phục. Do đó, việc sử dụng hạt nano kim loại trong nông nghiệp cần được quản lý chặt chẽ và đánh giá rủi ro, trong khi tìm kiếm các giải pháp thay thế an toàn hơn đang là hướng nghiên cứu quan trọng [9].

Silica (Si) được công nhận rộng rãi là một nguyên tố có lợi cho thực vật. Với sự xuất hiện của công nghệ nano trong nông nghiệp, hạt nano silica (SiNP) được cấu thành từ silicon dioxide (SiO_2) đã thể hiện khả năng ứng dụng đầy hứa hẹn trong nông nghiệp bền vững [10]. Đặc biệt, ứng dụng SiNP được chứng minh là một chiến lược hiệu quả cao và tiết kiệm chi phí để bảo vệ cây trồng khỏi các loại stress sinh học và phi sinh học như sâu bệnh, bệnh do vi sinh vật gây ra, stress kim loại, hạn hán và stress mặn [11]. Với tính chất không độc hại và khả năng phân hủy sinh học, SiNP giúp giảm tác động tiêu cực đến môi trường so với NP kim loại truyền thống. Ứng dụng SiNP trong nông nghiệp không chỉ đảm bảo an toàn cho môi trường và sức khỏe con người mà còn hỗ trợ phát triển nông nghiệp bền vững. Mặc dù đã có tiến bộ nhanh chóng trong nghiên cứu các chức năng và cơ chế của SiNP để thúc đẩy tính bền vững, nhưng tổng quan toàn diện về chủ đề này vẫn còn thiếu.

Bài tổng quan này nghiên cứu tiềm năng của SiNP trong bảo vệ thực vật, nhằm cải thiện hiệu quả kiểm soát sâu bệnh và nâng cao sức đề kháng cây trồng qua cơ chế tương tác phân tử và sinh lý. Nghiên cứu tập trung vào các phương pháp tổng hợp SiNP với độ tinh khiết cao, kích thước đồng đều, và khả năng kiểm soát thông số vật liệu để tối ưu hóa ứng dụng trong nông nghiệp. Bên cạnh đó, nghiên cứu khám phá vai trò của SiNP như chất mang thuốc bảo vệ thực vật, giải phóng có kiểm soát qua yếu tố môi trường (pH, enzyme, nhiệt độ), nhằm giảm dư lượng hóa chất và tác động xấu

đến môi trường. Nghiên cứu cũng đánh giá ảnh hưởng của SiNP đối với hệ sinh thái đất và khả năng giảm thiểu tồn dư thuốc bảo vệ thực vật, đóng góp vào giải pháp nông nghiệp bền vững, thân thiện với môi trường.

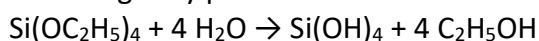
2. CÁC PHƯƠNG PHÁP TỔNG HỢP HẠT NANO SILICA

2.1. Phương pháp tổng hợp hạt nano silica truyền thống

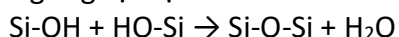
SiNP có thể được tổng hợp thông qua nhiều phương pháp truyền thống, phổ biến như phương pháp sol-gel, phương pháp ngưng tụ hơi hóa học (chemical vapor condensation), và phương pháp Stöber [12-17].

Phương pháp sol-gel là một kỹ thuật phổ biến và hiệu quả để tổng hợp gel Si và SiNP. Phương pháp này dựa trên quá trình chuyển đổi từ dung dịch keo (sol) thành mạng lưới rắn (gel) thông qua các phản ứng hóa học của các tiền chất chứa Si [16]. Quá trình sol-gel tổng hợp SiNP bao gồm hai giai đoạn chính: thủy phân và ngưng tụ các tiền chất như tetraethyl orthosilicate [$\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$] hoặc sodium silicate (Na_2SiO_3), thường có mặt chất xúc tác. Giai đoạn thủy phân tạo nhóm silanol ($\text{Si}-\text{OH}$), tiền đề cho phản ứng ngưng tụ hình thành liên kết siloxane ($\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$), tạo mạng lưới silica ba chiều chuyển từ sol sang gel [15]. Chu trình phản ứng được mô tả như sau:

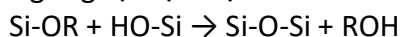
Phản ứng thủy phân:



Ngưng tụ loại nước:



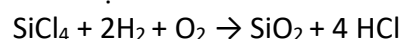
Ngưng tụ loại rượu:



Quá trình sol-gel được điều chỉnh thông qua các yếu tố như pH, nhiệt độ, nồng độ tiền chất, tỷ lệ nước/tiền chất và chất xúc tác, từ đó kiểm soát được kích thước, hình dạng và cấu trúc của SiNP. Môi trường acid làm thủy phân chậm nhưng ngưng tụ nhanh, tạo ra SiNP nhỏ và đồng nhất, trong khi môi trường kiềm thúc đẩy thủy phân nhanh và ngưng tụ chậm, dẫn đến hạt lớn hơn và cấu trúc phân nhánh. Nhiệt độ cao làm tăng tốc độ thủy phân và ngưng tụ, tạo ra hạt nhỏ hơn, trong khi nhiệt độ thấp tạo ra hạt lớn hơn với tốc độ phản ứng chậm. Nồng độ tiền chất ảnh hưởng đến mật độ mạng lưới

silica, với nồng độ cao tạo ra hạt lớn hơn và độ xốp thấp, ngược lại nồng độ thấp tạo hạt nhỏ hơn và độ xốp cao hơn. Tỷ lệ nước/tiền chất cao thúc đẩy quá trình thủy phân hoàn toàn, dẫn đến hạt nano đồng nhất, trong khi tỷ lệ thấp hạn chế thủy phân, tạo hạt có kích thước lớn hơn và cấu trúc không đồng nhất. Chất xúc tác acid làm thủy phân chậm và ngưng tụ nhanh, tạo hạt nhỏ và đồng nhất, trong khi chất xúc tác kiềm thúc đẩy thủy phân nhanh nhưng ngưng tụ chậm, dẫn đến hạt lớn hơn. Sau khi gel silica hình thành, quá trình sấy khô được thực hiện để loại bỏ dung môi và sản phẩm phụ, thu được SiNP rắn. Sấy cần được kiểm soát cẩn thận để tránh hiện tượng co ngót và nứt vỡ, với các phương pháp sấy như sấy ở nhiệt độ phòng, chân không hoặc sấy đông khô. Ngoài ra, gel silica có thể được nung kết ở nhiệt độ cao để tăng cường độ bền cơ học và loại bỏ tạp chất, đồng thời tối ưu hóa nhiệt độ và thời gian nung để duy trì chất lượng hạt nano [15, 16].

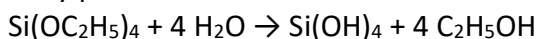
Ngưng tụ hơi hóa học cũng là một phương pháp tổng hợp nổi bật để sản xuất SiNP, dựa trên các phản ứng hóa học trong pha khí và quá trình ngưng tụ các sản phẩm tạo thành hạt nano. Phương pháp này cho phép tổng hợp SiNP với độ tinh khiết cao, kích thước hạt đồng nhất và khả năng kiểm soát tốt các thông số vật liệu, đáp ứng yêu cầu của các ứng dụng công nghệ cao. Trong quá trình ngưng tụ hơi hóa học, silicon tetrachloride (SiCl_4) được sử dụng làm tiền chất bay hơi. Silicon tetrachloride được đưa vào phản ứng với oxygen (O_2) và hydrogen (H_2) ở nhiệt độ cao, thường trong khoảng từ 1000-1500°C [14]. Phản ứng chính có thể được biểu diễn như sau:



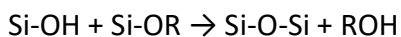
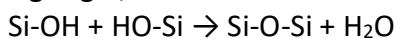
Kết quả của phản ứng là sự hình thành các hạt nano silica (SiO_2) trong pha khí, sau đó các hạt này ngưng tụ và kết tụ lại để tạo thành SiNP. Các sản phẩm phụ như hydrogen chloride (HCl) được loại bỏ khỏi hệ thống thông qua các biện pháp xử lý khí thải thích hợp. Trong phương pháp này, kích thước và hình dạng của SiNP có thể được điều chỉnh bằng cách kiểm soát các thông số phản ứng trong quá trình ngưng tụ hơi hóa học, bao gồm nhiệt độ phản ứng, áp suất, tỷ lệ khí và thời gian lưu [14].

Phương pháp Stöber, phát triển bởi Werner Stöber vào năm 1968, là kỹ thuật hiệu quả để tổng hợp SiNP đơn phân tán với kích thước đồng nhất. Quá trình này dựa trên thủy phân và ngưng tụ các tiền chất alkoxysilane, chủ yếu là tetraethyl orthosilicate, trong môi trường cồn như ethanol hoặc methanol. Chất xúc tác kiềm, thường là amoniac (NH_3), giúp thúc đẩy quá trình phản ứng. Quá trình tổng hợp bao gồm hai giai đoạn chính: thủy phân tetraethyl orthosilicate với nước để tạo ra các nhóm silanol (Si-OH), sau đó các nhóm silanol tham gia vào phản ứng ngưng tụ, hình thành liên kết siloxane (Si-O-Si), dẫn đến sự phát triển mạng lưới Si và tạo ra các hạt Si hình cầu đồng đều trong dung dịch [17].

Thủy phân tiền chất:



Ngưng tụ các nhóm silanol:



Kích thước và đặc tính của các hạt SiNP được kiểm soát thông qua nhiều thông số phản ứng. Tỷ lệ nước/TEOS cao thường thúc đẩy quá trình thủy phân hoàn toàn, dẫn đến sự hình thành các hạt nhỏ hơn và đồng nhất hơn. Nồng độ amoniac trong dung dịch cũng ảnh hưởng đến tốc độ ngưng tụ và độ đồng nhất của hạt. Ngoài ra, nhiệt độ phản ứng cao có xu hướng tăng tốc độ hình thành mầm hạt, làm giảm kích thước hạt.

2.2. Phương pháp tổng hợp xanh hạt nano silica

Việc tổng hợp SiNP bằng phương pháp tổng hợp xanh đã thu hút sự quan tâm đáng kể do nhiều ưu điểm. Phương pháp này sử dụng các nguyên liệu tự nhiên, tái tạo và quy trình thân thiện với môi trường, mang lại nhiều ưu điểm vượt trội so với các phương pháp tổng hợp hóa học truyền thống [12].

Trong các quy trình tổng hợp sinh học SiNP sử dụng nguyên liệu thực vật, phương pháp tổng hợp xanh thường bao gồm hai bước chính, chiết xuất silicate và hình thành SiNP thông qua phương pháp sol-gel. Quá trình bắt đầu bằng việc chiết xuất silicate từ các nguyên liệu thực vật giàu Si, như vỏ trấu, vỏ tre, vỏ mía và các phế thải nông nghiệp khác. Các nguyên liệu này

được xử lý nhiệt ở khoảng $500-700^\circ\text{C}$ trong môi trường không khí hoặc khí trơ để loại bỏ cacbon và các chất hữu cơ, tạo ra tro giàu Si. Tro này sau đó được xử lý bằng dung dịch kiềm mạnh, như sodium hydroxide, để hòa tan Si, tạo thành dung dịch sodium silicate. Tiếp theo, dung dịch sodium silicate được trung hòa bằng hydrochloric acid, dẫn đến sự hình thành silicic acid. Silicic acid sau đó trải qua quá trình ngưng tụ để tạo ra SiNP [20].

Nguyên liệu từ phế thải nông nghiệp là nguồn tài nguyên tái tạo, dồi dào và sẵn có, giúp giảm sự phụ thuộc vào các nguyên liệu hóa học đắt tiền và không tái tạo. Điều này không chỉ mang lại lợi ích kinh tế cho quá trình sản xuất SiNP mà còn hỗ trợ phát triển kinh tế nông thôn và tạo giá trị gia tăng cho các sản phẩm phụ nông nghiệp. Phương pháp tổng hợp xanh giảm thiểu việc sử dụng các hóa chất độc hại và dung môi hữu cơ nguy hiểm thường được sử dụng trong các phương pháp tổng hợp hóa học truyền thống. Việc sử dụng nguyên liệu tự nhiên và quy trình không gây ô nhiễm giúp giảm phát thải các chất độc hại vào môi trường, bảo vệ hệ sinh thái và sức khỏe con người. Hơn nữa, việc giảm lượng chất thải hóa học và khí thải trong quá trình sản xuất SiNP góp phần giảm tác động tiêu cực đến môi trường, phù hợp với xu hướng phát triển bền vững và trách nhiệm môi trường trong ngành công nghiệp hiện đại. SiNP tổng hợp xanh thường không chứa các tạp chất độc hại hoặc dư lượng hóa chất nguy hiểm, đảm bảo tính an toàn và tương thích sinh học cao, giảm nguy cơ gây hại cho môi trường, động vật và con người. Quy trình tổng hợp xanh thường diễn ra ở điều kiện nhiệt độ và áp suất thấp, không yêu cầu năng lượng cao như các phương pháp tổng hợp hóa học truyền thống. Việc giảm tiêu thụ năng lượng trong quá trình sản xuất SiNP không chỉ giảm chi phí vận hành mà còn giảm phát thải khí nhà kính, góp phần vào việc chống biến đổi khí hậu. Sự tiết kiệm năng lượng này làm cho phương pháp tổng hợp xanh trở thành lựa chọn hiệu quả và bền vững hơn, phù hợp với các tiêu chuẩn môi trường và năng lượng hiện đại.

3. ỨNG DỤNG CỦA HẠT NANO SILICA TRONG BẢO VỆ THỰC VẬT

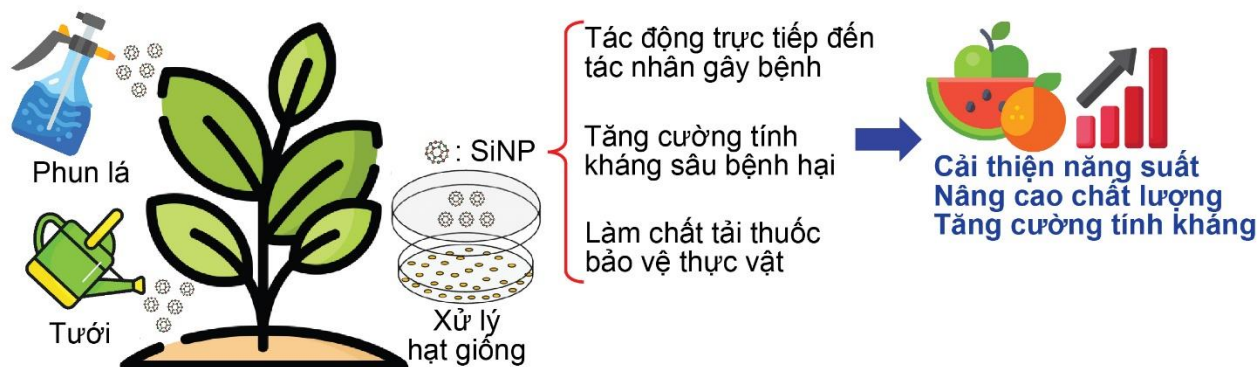
Hạt SiNP nổi bật so với các vật liệu nano khác, như hạt nano kim loại (Ag, Cu, Zn), nhờ tính không độc hại, khả năng phân hủy sinh học, và chi phí thấp (Hình 1). Không giống như NP kim loại có nguy cơ tích lũy trong môi trường và gây độc cho hệ sinh thái đất, SiNP an toàn hơn và thân thiện với môi trường, phù hợp với nông nghiệp bền vững [2, 7]. Khả năng vượt trội của SiNP trong việc kiểm soát sâu bệnh được ghi nhận thông qua nhiều cơ chế, như tác động trực tiếp lên vi khuẩn, nấm, và côn trùng gây hại; kích hoạt hệ thống enzyme chống ôxi hóa; và điều chỉnh tín hiệu hormone thực vật [11]. Điều này khác biệt rõ rệt so với NP kim loại, vốn chủ yếu tác động trực tiếp và ít kích hoạt các cơ chế phòng vệ nội sinh của cây [10].

3.1. Tác động trực tiếp của hạt nano silica trong kiểm soát sâu bệnh hại

Hạt SiNP được coi là một thuốc trừ sâu thân thiện với môi trường, có khả năng ức chế sự phát triển và độc tính của các tác nhân gây bệnh, từ đó bảo vệ cây trồng khỏi sự tấn công của vi khuẩn, nấm và côn trùng trong canh tác nông nghiệp [10].

Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng SiNP gây ra hiệu ứng kháng nấm đáng kể đối với nấm *Rhizoctonia solani* và *Alternaria solani* trong các thí nghiệm nuôi cấy [21, 22]. Cụ thể, các hạt nano silicon dioxide (SiO_2NP) tổng hợp xanh từ dịch chiết nghệ tây (*Crocus sativus*) có kích thước 9,92-19,8 nm thể hiện hoạt tính kháng mạnh đối với *R. solani* (hiệu quả ức chế sự phát triển của sợi nấm, giảm trọng lượng khô và trọng lượng tươi của sợi nấm) trên cây lúa mì (*Triticum aestivum*) [21]. Hơn nữa, xử lý SiO_2NP

được chứng minh là tăng cường tỷ lệ nảy mầm, cải thiện chỉ tiêu nông sinh học, tăng hàm lượng chlorophyll và carotenoid của cây lúa mì bị nhiễm bệnh [21]. Theo đó, một trong những cơ chế mà SiO_2NP bảo vệ cây lúa mì là kích thích tích lũy các hợp chất liên quan đến cơ chế phòng thủ ở thực vật, liên quan đến con đường tín hiệu salicylic acid, tăng cường biểu hiện của gene mã hóa enzyme chống ôxi hóa (peroxidase, superoxide dismutase, ascorbate peroxidase, catalase và polyphenol oxidase), cũng như các chất chống ôxi hóa khác (phenolic và flavonoid) [21]. Tương tự, SiO_2NP cũng có thể được tổng hợp xanh thông qua lọc sinh khối của *Aspergillus niger* kết hợp với tiền chất và nung ở 150°C để tạo thành bột SiO_2NP [22]. Sự kết hợp của các enzyme và protein từ *A. niger* giúp chuyển đổi sodium silicate thành hạt SiO_2NP , với kích thước trung bình từ 5-250 nm [22]. Thử nghiệm khuếch tán trên thạch cho thấy SiO_2NP có hoạt tính kháng nấm mạnh đối với *A. solani*, thể hiện với vòng kháng nấm đạt 48 mm tại nồng độ 1000 $\mu\text{g/mL}$ [22]. Xử lý SiO_2NP ở nồng độ 50 và 100 ppm đã làm giảm chiều dài vết bệnh, đồng thời cải thiện chiều dài thân và rễ, số lượng lá, hàm lượng chlorophyll và carotenoid, proline, và phenol tự do cao hơn [22]. Đồng thời, hoạt tính của các enzyme chống ôxi hóa, như superoxide dismutase và polyphenol oxidase tăng lần lượt 643,46% và 312,39% so với cây đối chứng [22]. Điều này cho thấy SiO_2NP không chỉ cải thiện khả năng chống chịu stress ôxi hóa mà còn đóng vai trò quan trọng trong việc tăng cường hệ miễn dịch của cây chống lại sâu bệnh hại [10, 21, 22].



Hình 1. Ứng dụng của hạt nano silica trong bảo vệ thực vật

Ngoài ra, phức hợp Ag/SiO₂NP (kết hợp giữa Si và Ag) cũng thể hiện hiệu quả đối kháng với tác nhân gây bệnh, như *Botrytis cinerea*, *Pseudomonas syringae* và *Xanthomonas campestris* [23, 24]. Ví dụ, phức hợp Ag/SiO₂NP thể hiện khả năng kháng mạnh đối với nấm gây bệnh đốm nâu *B. cinerea* [24]. Theo đó, nồng độ ức chế tối thiểu của Ag/SiO₂NP là 40 ppm, thấp hơn so với AgNP (60 ppm), AgNO₃ (95 ppm), và SiO₂ (110 ppm), cho thấy hiệu quả cao hơn trong việc ức chế nấm so với các chất này [24]. Phức hợp Ag/SiO₂NP cũng cải thiện sinh khối và chiều dài rễ, đồng thời tăng tỷ lệ rễ/chồi, tăng hàm lượng protein tổng số, giúp cây khỏe mạnh và phát triển tốt hơn [24]. Tương tự như SiO₂NP, phức hợp Ag/SiO₂NP thúc đẩy sự sản sinh proline, phenol, cũng như tăng cường hoạt tính của peroxidase và polyphenol oxidase trên cây bị nhiễm bệnh. trong cây đậu tằm tăng đáng kể khi nhiễm bệnh [24].

So sánh với các NP kim loại khác, SiNP được báo cáo có hoạt tính ức chế tác nhân gây bệnh tốt hơn. Ví dụ, SiNP và hạt nano titanium (TiNP) đều thể hiện khả năng ức chế sự phát triển của *Phomopsis vexans* và *Ralstonia solanacearum* [25]. Tương tự, SiO₂NP thể hiện khả năng kháng nấm và kháng khuẩn mạnh mẽ đối với các tác nhân gây bệnh, như *Ralstonia solanacearum*, *Phomopsis vexans*, và tuyến trùng *Meloidogyne incognita* [25]. Ở nồng độ 0,20 mg/mL, SiO₂NP đạt hiệu quả ức chế nấm 41,2% đối với *P. vexans* và ức chế sự nở trứng của tuyến trùng 58,82%, vượt trội so với TiNP. Tỷ lệ tử vong của ấu trùng J2 khi xử lý SiO₂NP đạt 81,0%, cao hơn đáng kể so với TiNP (45,0%) [25]. Các quan sát qua kính hiển vi cho thấy SiO₂NP gây biến dạng cấu trúc sợi nấm và phá hủy lớp biểu bì của tuyến trùng [25].

Trong một thí nghiệm khác, thử nghiệm tiếp xúc bề mặt đã chứng minh khả năng kháng sâu bệnh vượt trội của SiO₂NP tổng hợp từ các chất hoạt động bề mặt khác nhau [26]. Sau 3 ngày, tỷ lệ tử vong của sâu *Spodoptera littoralis* đạt 96,6% đối với SiO₂NP tổng hợp dựa vào Triton X-100 (TX), 93,3% với SiO₂NP tổng hợp dựa vào cetyltrimethylammonium bromide (CTAB) và 90,0% với SiO₂NP tổng hợp

dựa vào polyvinylpyrrolidone (PVP) [26]. Trong thử nghiệm trên sâu ăn lá, các SiO₂NP cho thấy hiệu quả độc tính cao hơn đối chứng ở mọi nồng độ [26]. Ở nồng độ 1000 ppm, tỷ lệ tử vong tích lũy đạt 92,2% với SiO₂NP tổng hợp dựa vào PVP, 73,1% với SiO₂NP tổng hợp dựa vào CTAB và 52,3% với SiO₂NP tổng hợp dựa vào TX [26]. Theo đó, SiO₂NP có thể gây ra những biến dạng trên cơ thể nhộng và cản trở sự trưởng thành của sâu [26]. Tỷ lệ biến dạng nhộng ở SiO₂NP tổng hợp dựa vào TX là 6,7%, SiO₂NP tổng hợp dựa vào CTAB là 13,4%, và SiO₂NP tổng hợp dựa vào PVP là 3,4% [26]. Những biến dạng này ngăn chặn sâu tiến hóa thành côn trùng trưởng thành, tăng cường hiệu quả kiểm soát sâu hại [26].

Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng hiệu quả độc tính của SiNP chủ yếu bị chi phối bởi kích thước hạt, thay vì các đặc điểm bề mặt như diện tích bề mặt hay cấu trúc hình thái [10, 12, 15, 17]. SiNP có kích thước nhỏ, cho phép thâm nhập tốt vào lớp biểu bì của sâu, tăng cường hiệu quả kháng sâu bệnh. Đặc tính bề mặt ưa nước của SiO₂NP tổng hợp từ PVP tạo điều kiện thuận lợi cho sự tương tác với lớp lipid biểu bì của sâu, dẫn đến mất nước và chết do khô hạn. Ngoài ra, SiNP gây stress ôxi hóa bằng cách tạo ra các gốc ôxi nguyên tử hoạt động (ROS) trong hệ tiêu hóa của sâu, gây tổn thương màng tế bào, protein và DNA, gián đoạn các quá trình sinh lý. SiNP cũng gây tổn thương cơ học khi bám vào biểu bì, làm mất khả năng bảo vệ của lớp biểu bì, dẫn đến mất nước nghiêm trọng. Tổn thương kép từ stress ôxi hóa và tác động cơ học tạo ra hiệu quả kiểm soát sâu hại [27, 28].

3.2. Hiệu quả của hạt nano silica để tăng cường tính kháng sâu bệnh hại trên cây trồng

Bên cạnh các tác động trực tiếp như thuốc trừ sâu, việc xử lý hạt giống và phun lá bằng SiNP có thể tăng cường tỷ lệ nảy mầm của hạt, thúc đẩy sinh trưởng và nâng cao năng suất cây trồng trong điều kiện lây nhiễm sâu bệnh hại khác nhau [27, 29]. Xử lý hạt giống bằng SiNP là biện pháp canh tác hiệu quả, giúp tăng khả năng nảy mầm và tính chống chịu của cây trồng trước tác động của bệnh. Cơ chế này có thể liên quan đến khả năng kích thích sinh lý của SiNP, làm tăng cường hoạt động của các enzyme liên

quan đến nảy mầm, cải thiện hấp thụ nước và các chất dinh dưỡng cần thiết [10, 11]. Đồng thời, SiNP cũng góp phần tăng cường sức đề kháng của hạt giống và cây mầm thông qua việc giảm thiểu tổn thương do tác nhân gây bệnh. Ngoài ra, phun lá bằng SiNP, bên cạnh việc hỗ trợ các chức năng trên, còn tạo nên một lớp bảo vệ bề mặt, giúp cây chống lại các tác nhân gây bệnh bên ngoài, đồng thời tối ưu hóa quá trình quang hợp và sử dụng dinh dưỡng [28, 30]. Việc áp dụng đồng thời cả xử lý hạt giống và phun lá bằng SiNP không chỉ giúp cải thiện chất lượng hạt giống và cây trồng mà còn nâng cao năng suất trong các hệ thống canh tác chịu nhiều do sâu bệnh hại [10, 11].

Thử nghiệm cho thấy SiO₂ NP cải thiện tỷ lệ nảy mầm, sinh trưởng và chỉ số sức sống của các giống lúa mì bị nhiễm *R. solani* [21]. Ở nồng độ 100 µg/mL, tỷ lệ nảy mầm đạt 98% ở hạt không nhiễm bệnh và tăng đáng kể ở hạt bị nhiễm bệnh [21]. SiO₂ NP cũng thúc đẩy đáng kể chiều dài rễ, chiều dài thân, và chỉ số sức sống của cây con [21]. Cây lúa mì nhiễm *R. solani* có xu hướng bị giảm nồng độ các sắc tố quang hợp như chlorophyll a, chlorophyll b và carotenoid lần lượt là 30%, 30%, và 20% so với cây khỏe mạnh. Tuy nhiên, xử lý bằng SiO₂ NP giúp giảm thiểu sự suy giảm này, đặc biệt ở nồng độ 100 µg/mL, bảo vệ sắc tố quang hợp ngay cả ở cây bị nhiễm bệnh [21]. Tương tự, nhiễm *R. solani* gây tích lũy hydrogen peroxide, anion superoxide, và gốc hydroxyl, dẫn đến peroxid hóa lipid và tăng methylglyoxal. Tuy nhiên, xử lý SiO₂ NPs làm giảm các chỉ số này, đặc biệt ở nồng độ 100 µg/mL, giúp duy trì trạng thái cân bằng và bảo vệ cây lúa mì khỏi stress ôxi hóa [21]. Ở nồng độ này, SiO₂ NP được chứng minh là thúc đẩy sự tích lũy flavonoid, phenolic và salicylic acid, tăng hoạt động của enzyme phenylalanine ammonia-lyase, hỗ trợ sinh tổng hợp salicylic acid và tăng cường khả năng phòng vệ của cây lúa mì [21]. Hoạt tính của các enzyme chống ôxi hóa, như SOD, POD, APX và CAT cũng được cải thiện làm giảm thiểu tác động tiêu cực của *R. solani* và tăng khả năng bảo vệ của cây lúa mì [21].

Trong một ví dụ khác, SiNP phủ chitosan đã được chứng minh là cải thiện tỷ lệ nảy mầm và

năng suất dưa hấu, đồng thời hỗ trợ kiểm soát bệnh héo do *Fusarium* spp. hiệu quả [31]. Trong điều kiện không nhiễm bệnh, SiNP phủ chitosan làm tăng tỷ lệ nảy mầm và kích thích phát triển cây con nhờ khả năng kích hoạt enzyme chống ôxi hóa, được cho là đến từ thành phần chitosan [31]. Khi xử lý mẫu đất nhiễm *F. oxysporum*, SiNP phủ chitosan làm giảm mức độ tiến triển bệnh khoảng 27%, chủ yếu thông qua việc kích thích cơ chế phòng vệ tự nhiên của cây, thay vì tác động độc trực tiếp lên mầm bệnh [31]. Thử nghiệm trên đồng ruộng cho thấy, xử lý SiNP phủ chitosan ở giai đoạn cây con đã tăng năng suất dưa hấu lên đến 70% [31].

Phun lá bằng SiNP là một phương pháp phổ biến trong canh tác nhằm bảo vệ cây trồng khỏi các tác nhân gây bệnh và sâu hại. Các nghiên cứu đã chứng minh rằng, phun SiNP lên lá có khả năng giảm thiểu tác động tiêu cực của các tác nhân gây bệnh đến sự phát triển của cây và giảm triệu chứng bệnh trên cây trồng bị nhiễm. Phương pháp này đã được áp dụng hiệu quả trên các loại cây bị nhiễm nhiều loại mầm bệnh và sâu hại khác nhau, bao gồm *R. solanacearum* [25, 32], *A. solani* [21, 22], *Plasmopara viticola* [33], *F. oxysporum* [31], cũng như sâu hại như *Mythimna separata* [34], *Aphis craccivora* và *Spodoptera littoralis* [28].

Như vậy, SiNP đã được chứng minh là cải thiện khả năng kháng sâu bệnh hại phổ rộng trên các đối tượng cây trồng thông qua việc điều chỉnh hệ thống phòng vệ của cây ở cấp độ sinh lý và phân tử. Các cơ chế chính bao gồm tăng cường chuyển hóa các hợp chất phòng vệ, điều hòa hệ thống chống ôxi hóa, và điều chỉnh tín hiệu hormone thực vật. Sử dụng SiNP hiệu quả hơn so với Si thông thường trong việc nâng cao khả năng kháng nấm bệnh [10-12]. Ví dụ, SiNP kích thích chuyển hóa phenolic, giúp cây ngô kháng lại *F. oxysporum* và *A. niger* [35]. Đối với sâu hại, SiNP thúc đẩy chuyển hóa các hợp chất hóa học phòng vệ như chlorogenic acid và phenolic tổng số, bảo vệ cây ngô trước sâu keo mùa thu [34]. Trong các thí nghiệm khác, SiNP giảm quần thể sâu hại trên đậu nành và đậu faba thông qua việc thu hút các loài săn mồi tự nhiên, có khả năng liên quan đến điều chỉnh

chuyển hóa hợp chất bay hơi [28]. Nghiên cứu cho thấy SiNP tăng cường hoạt động của enzyme chống ôxi hóa và các chất chống oxy hóa không enzyme, giúp duy trì cân bằng ROS trong cây trồng, như cà tím bị nhiễm *A. solani* và lúa mì bị nhiễm *R. solani* [21, 22]. Điều này không chỉ hỗ trợ nhận diện tác nhân gây bệnh mà còn làm giảm tổn thương ôxi hóa do sự dư thừa ROS nội bào gây ra. SiNP điều chỉnh các hormone quan trọng trong đáp ứng tổn thương gây ra bởi tác nhân gây bệnh, như salicylic acid, jasmonic acid, và ethylene [10-12]. Ví dụ, phun SiNP trên lá giúp tăng cường chuyển hóa salicylic acid thông qua điều hòa biểu hiện gene liên quan được ghi nhận trên cây cà chua bị nhiễm *Ralstonia solanacearum* [32]. Tương tự, SiNP điều hòa con đường tín hiệu jasmonic acid và ethylene, cải thiện khả năng kháng *Plasmopara viticola* ở nho [33]. Ngoài ra, SiNP có thể kích hoạt tín hiệu salicylic acid thông qua việc giải phóng silicic acid hoặc làm tắc nghẽn khí khổng, từ đó kích hoạt khả năng kích kháng lưu dẫn (systemic acquired resistance). Quá trình này giúp tăng cường khả năng kháng bệnh do *Pseudomonas syringae* ở Arabidopsis [36]. Điều này cho thấy tiềm năng lớn của việc ứng dụng SiNPs trong bảo vệ cây trồng và tăng cường khả năng kháng sâu bệnh hại.

3.3. Sử dụng hạt nano silica làm chất tải thuốc bảo vệ thực vật

Cả Si thông thường và SiNP đều đóng vai trò quan trọng trong giảm thiểu tác nhân gây bệnh ở cây trồng thông qua việc hoạt động như chất kích thích tăng trưởng [10, 12]. Tuy nhiên, SiNP thể hiện sự vượt trội hơn với các ứng dụng đặc biệt trong bảo vệ thực vật, đặc biệt là trong việc vận chuyển và cải thiện hiệu quả của thuốc trừ sâu. Theo đó, nhờ cấu trúc xốp độc đáo, SiNP có khả năng hấp thụ và lưu giữ các phân tử thuốc trừ sâu, cho phép SiNP hoạt động như chất mang hiệu quả [27, 37]. Các nghiên cứu đã chứng minh rằng SiNP thể hiện hiệu quả hấp thụ thuốc trừ sâu của cây trồng tăng lên đáng kể, đồng thời độ bền của thuốc trong môi trường và cây trồng cũng được kéo dài [37]. Hơn nữa, SiNP có thể được áp dụng trực tiếp hoặc sau khi trải qua các bước biến đổi hóa học,

giúp tối ưu hóa khả năng tương tác giữa thuốc trừ sâu và cây trồng, giảm sự bay hơi và phân hủy của thuốc trong môi trường.

Trong một nghiên cứu gần đây, cấu trúc xốp của SiO₂NP gắn chấm carbon (carbon dots-embedded fluorescent mesoporous silica nanoparticles) cho phép lưu trữ một lượng lớn các phân tử indoxacarb (thuốc trừ nhóm oxadiazine thuộc nhóm sâu, có tác dụng tiêu diệt trùng Lepidoptera - bộ cánh Vẩy) trong các khoảng trống, tạo điều kiện thuận lợi cho việc giải phóng kéo dài thông qua các mao quản [38]. Kết quả thí nghiệm cho thấy cơ chế giải phóng có thể xảy ra nhanh lúc ban đầu (indoxacarb bám trên bề mặt ngoài của các NP, đáp ứng nhu cầu tức thời trong kiểm soát côn trùng) và chậm dần sau đó (duy trì hiệu quả bảo vệ cây trồng lâu dài). Đặc biệt, tỷ lệ phóng thích indoxacarb tăng lên khi độ pH tăng, với giá trị tích lũy đạt 62% ở pH 4,8 và 84% ở pH 8,9 sau 48 giờ [38]. Sự bất ổn định của liên kết Si-O-Si trong môi trường kiềm dẫn đến sự phân rã cấu trúc xốp, làm tăng tốc độ phóng thích thuốc trừ sâu. Ở nồng độ 25 mg/L, indoxacarb tải trên SiO₂NP đạt tỷ lệ tử vong 90% sau 48 giờ, cao hơn đáng kể so với thuốc trừ sâu indoxacarb thông thường (76%) [38]. Hình ảnh hiển vi quét điện tử xác nhận rằng SiO₂NP gắn chấm carbon cải thiện khả năng bám dính trên lá, giảm thiểu sự thất thoát thuốc và gia tăng hiệu quả diệt côn trùng. Đánh giá khả năng kháng thuốc của *P. xylostella* cho thấy hoạt tính của các enzyme GST, CarE và P450 giảm đáng kể khi xử lý bằng indoxacarb tải trên SiO₂NP so với indoxacarb thông thường [38]. Quan sát bằng hiển vi đồng tiêu laser xác nhận sự hiện diện của SiO₂NP gắn chấm carbon trong ruột giữa của *P. xylostella* sau xử lý [38].

Tương tự, cấu trúc xốp của SiO₂NP cũng được sử dụng để tải prochloraz (thuốc trừ nấm, có tác dụng tiêu diệt *Magnaporthe oryzae*), từ đó ứng dụng trong phòng trừ bệnh đạo ôn trên cây lúa gạo [39]. Lớp pectin phủ trên NP đóng vai trò giúp ngăn ngừa sự giải phóng prochloraz sớm, tạo điều kiện cho sự giải phóng dần dần khi được kích hoạt bởi pectinase do *M. oryzae* tiết ra. Sau 30 ngày, tỷ lệ giải phóng prochloraz

tích lũy đạt 59,62% ở pH 5,0, 77,36% ở pH 9,0, và chỉ 30,85% ở pH 7,0 [39]. Sự thủy phân lớp vỏ pectin trong môi trường kiềm và phân cắt liên kết amide trong môi trường acid giải thích kết quả prochloraz tải trên SiO₂NP có hoạt tính diệt *M. oryzae* vượt trội so với dạng thông thường. Cụ thể, giá trị EC₅₀ và EC₉₀ của prochloraz trên SiO₂NP lần lượt là 0,113 mg/L và 0,657 mg/L (sau 7 ngày), thấp hơn đáng kể so với dạng thông thường (0,151 mg/L và 1,197 mg/L). Nồng độ prochloraz trong các phần của cây đạt cao nhất vào ngày đầu tiên (lá) và ngày thứ ba (thân, rễ) sau xử lý, sau đó giảm dần sau 14 ngày, cho thấy khả năng duy trì hoạt chất kéo dài của SiO₂NP [39].

Có thể thấy rằng, việc ứng dụng SiNP như một phương tiện tải thuốc trừ sâu không chỉ nâng cao độ chính xác trong việc nhắm mục tiêu mà còn thúc đẩy khả năng kiểm soát giải phóng thuốc bảo vệ thực vật trong cây trồng hoặc sâu hại. Cơ chế giải phóng thuốc bảo vệ thực vật dựa trên SiNP chủ yếu dựa theo bốn hướng, cảm ứng với điều kiện pH, cảm ứng với nhiệt độ, kích hoạt bởi enzyme phân giải, và vận chuyển hướng vào hệ tiêu hóa của sâu hại [10-12, 17].

4. MỘT SỐ LƯU Ý TRONG SỬ DỤNG CỦA HẠT NANO SILICA TRONG BẢO VỆ THỰC VẬT

Hạt SiNP đã chứng minh tiềm năng vượt trội trong việc bảo vệ thực vật nhờ các ưu điểm nổi bật so với các vật liệu nano khác, như khả năng phân hủy sinh học, tính an toàn cao, và chi phí thấp [10]. Tuy nhiên, để tối ưu hóa hiệu quả và giảm thiểu rủi ro môi trường, cần chú trọng một số yếu tố khi sử dụng.

So với hạt nano kim loại, SiNP thân thiện hơn với môi trường nhờ khả năng phân hủy tự nhiên. Các nghiên cứu cho thấy SiNP có thể giảm đáng kể dư lượng thuốc bảo vệ thực vật trong đất và trên cây trồng, đồng thời ít ảnh hưởng đến vi sinh vật đất. Sử dụng SiNP làm chất mang cho prochloraz và spirotetramat đã giảm rõ rệt dư lượng thuốc và các chất chuyển hóa trong dưa chuột, nâng cao an toàn thực phẩm và giảm tác động tiêu cực đến sức khỏe. Tuy nhiên, hầu hết nghiên cứu hiện nay chỉ tập trung vào ứng dụng SiNP trong dung dịch nước.

Một vấn đề khác để ứng dụng rộng rãi SiNP ở quy mô thương mại là chi phí sản xuất và tính khả thi kinh tế. Hiện nay, các phương pháp tổng hợp SiNP, như Stöber hoặc sol-gel, tuy cho phép kiểm soát tốt kích thước và đặc tính vật liệu nhưng thường yêu cầu các tiền chất đắt đỏ (như tetraethyl orthosilicate) và tiêu tốn năng lượng cao. Những yếu tố này có thể làm tăng chi phí sản xuất, khiến việc triển khai ở quy mô lớn trở nên khó khăn [12-17]. Để khắc phục, các phương pháp tổng hợp xanh sử dụng nguyên liệu từ phụ phẩm nông nghiệp (như vỏ trấu, thân cây ngô) đã được phát triển, giúp giảm chi phí và tăng tính bền vững [12]. Tuy nhiên, việc triển khai SiNP ở quy mô thương mại còn gặp thách thức liên quan đến cơ sở hạ tầng sản xuất và sự chấp nhận của thị trường. Quy trình sản xuất cần được tối ưu hóa để giảm thiểu năng lượng tiêu thụ và sử dụng các thiết bị đơn giản, nhằm đảm bảo tính khả thi cho các doanh nghiệp nhỏ và vừa trong ngành nông nghiệp. Đồng thời, cần có các chính sách hỗ trợ, như ưu đãi thuế hoặc tài trợ nghiên cứu, để thúc đẩy việc ứng dụng SiNP trong thực tiễn.

Mặc dù SiNP có tiềm năng trong bảo vệ thực vật, việc sử dụng chúng cần được quản lý cẩn thận để hạn chế tác động tiêu cực đến môi trường, đặc biệt là tồn dư thuốc trừ sâu trong đất. Khi làm chất mang hoặc hỗ trợ phân hủy thuốc, SiNP có thể kéo dài hiệu quả hoạt chất, nhưng cũng có thể gia tăng tích lũy thuốc trừ sâu nếu không được kiểm soát. Tồn dư lâu dài của các hợp chất này có thể làm giảm độ phì nhiêu đất và gây ô nhiễm nước ngầm. Cấu trúc mao quản và diện tích bề mặt lớn của SiNP có thể tương tác mạnh với hợp chất trong đất, thay đổi động lực học phân hủy, dẫn đến sự tồn tại lâu dài của các chất độc hại trong môi trường [10, 17]. Cần nghiên cứu đánh giá mức độ tồn dư thuốc trừ sâu trong đất sau khi sử dụng SiNP, cùng với tác động của chúng lên vi sinh vật đất và chu trình sinh địa hóa. Phát triển hệ thống SiNP tối ưu hóa để kiểm soát phân hủy hoặc giảm tồn dư thuốc bảo vệ thực vật trong đất là hướng nghiên cứu tiềm năng. Đồng thời, cần xây dựng tiêu chuẩn an toàn và hướng dẫn sử dụng SiNP trong nông nghiệp để

đảm bảo tính bền vững và giảm thiểu tác động môi trường.

5. KẾT LUẬN

- SiNP có tiềm năng lớn trong bảo vệ thực vật, cải thiện năng suất cây trồng và giảm tác động tiêu cực đến môi trường, nhờ cấu trúc xốp, diện tích bề mặt lớn và tính tương thích sinh học.

- SiNP kiểm soát sâu bệnh hại qua cơ chế kích hoạt enzyme chống ôxi hóa, điều chỉnh tín hiệu hormone và tạo stress cơ học lên tác nhân gây bệnh, giúp tăng sức đề kháng và giảm tổn thương quang hợp, vượt trội so với NP kim loại.

- SiNP là hệ thống vận chuyển thuốc bảo vệ thực vật hiệu quả, giúp kiểm soát giải phóng hóa chất, giảm thất thoát và hạn chế dư lượng trong môi trường. SiNP cũng có thể được tổng hợp từ phụ phẩm nông nghiệp, giảm chi phí sản xuất.

- Việc sử dụng SiNP cần được quản lý cẩn thận để giảm rủi ro tồn dư trong đất và ảnh hưởng đến hệ vi sinh vật và nước ngầm, yêu cầu nghiên cứu dài hạn để đánh giá tác động môi trường.

- Cần tối ưu hóa ứng dụng SiNP cho từng loại cây trồng và điều kiện canh tác cụ thể, xây dựng tiêu chuẩn an toàn và hướng dẫn sử dụng để đảm bảo tính bền vững và mở rộng khả năng ứng dụng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Almatroudi A. (2020). Silver nanoparticles: synthesis, characterisation and biomedical applications. *Open Life Sci.* 15(1): 819-839.

[2]. Guleria G., Thakur S., Shandilya M., Sharma S., Thakur S. & Kalia S. (2023). Nanotechnology for sustainable agro-food systems: The need and role of nanoparticles in protecting plants and improving crop productivity. *Plant Physiol Biochem.* 194: 533-549.

[3]. Haris M., Hussain T., Mohamed H. I., Khan A., Ansari M. S., Tauseef A., Khan A. A. & Akhtar N. (2023). Nanotechnology - A new frontier of nano-farming in agricultural and food production and its development. *Sci Total Environ.* 857(3): 159639.

[4]. Kour D., Khan S. S., Kumari S., Singh S., Khan R. T., Kumari C., Kumari S., Dasila H., Kour H., Kaur M., Ramniwas S., Kumar S., Rai A. K., Cheng W. H. & Yadav A. N. (2024). Microbial nanotechnology for agriculture, food, and environmental sustainability: Current status and future perspective. *Folia Microbiol.* 69: 491-520.

[5]. Tang Y., Zhao W., Zhu G., Tan Z., Huang L., Zhang P., Gao L. & Rui Y. (2023). Nano-pesticides and fertilizers: Solutions for global food security. *Nanomaterials.* 14(1): 90.

[6]. Chernousova S. & Eppe M. (2013). Silver as antibacterial agent: ion, nanoparticle, and metal. *Angew Chem Int Ed Engl.* 52(6): 1636-53.

[7]. Bahrulolum H., Nooraei S., Javanshir N., Tarrahimofrad H., Mirbagheri V. S., Easton A. J. & Ahmadian G. (2021). Green synthesis of metal nanoparticles using microorganisms and their application in the agrifood sector. *J Nanobiotechnology.* 19(1): 86.

[8]. Kaningini A. G., Nelwamondo A. M., Azizi S., Maaza M. & Mohale K. C. (2022). Metal nanoparticles in agriculture: A review of possible use. *Coatings.* 12(10): 1586.

[9]. El-Naggar M. E., Abdelsalam N. R., Fouda M., Mackled M., Al-Jaddadi M., Ali H., Siddiqui M. & Kandil E. (2020). Soil application of nano silica on maize yield and its insecticidal activity against some stored insects after the post-harvest. *Nanomaterials.* 10(4): 739.

[10]. Yuvaraj M., Sathya Priya R., Jagathjothi N., Saranya M., Suganthi N., Sharmila R., Cyriac J., Anitha R. & Subramanian K. S. (2023). Silicon nanoparticles (SiNPs): Challenges and perspectives for sustainable agriculture. *Physiol Mol Plant Pathol.* 128: 102161.

[11]. Yan G., Huang Q., Zhao S., Xu Y., He Y., Nikolic M., Nikolic N., Liang Y. & Zhu Z. (2024). Silicon nanoparticles in sustainable agriculture: synthesis, absorption, and plant stress alleviation. *Front Plant Sci.* 15: 1393458.

[12]. Saha A. & Mishra P. (2024). Greening the pathways: a comprehensive review of sustainable synthesis strategies for silica nanoparticles and their diverse applications. *RSC Advances.* 14(16): 11197-11216.

[13]. Fneich H. & Gaumer N. (2021). The effect of size and thermal treatment on the photoluminescent properties of europium-doped SiO₂ nanoparticles prepared in pne pot by sol-gel. *Materials.* 14(7): 1607.

[14]. Bhakta S., Dixit C. K., Bist I., Jalil K. A., Suib S. L. & Rusling J. F. (2016). Sodium hydroxide catalyzed monodispersed high surface area silica nanoparticles. *Mater Res Express.* 3(7): 075025.

[15]. Singh L. P., Bhattacharyya S. K., Kumar R., Mishra G., Sharma U., Singh G. & Ahalawat S. (2014). Sol-Gel processing of silica nanoparticles and their applications. *Adv Colloid Interface Sci.* 214: 17-37.

[16]. Dixit C. K., Bhakta S., Kumar A., Suib S. L. & Rusling J. F. (2016). Fast nucleation for silica nanoparticle synthesis using a sol-gel method. *Nanoscale.* 8(47): 19662-19667.

[17]. Murugadoss S., Lison D., Godderis L., Van Den Brule S., Mast J., Brassinne F., Sebaihi N. & Hoet P. H. (2017). Toxicology of silica nanoparticles: An update. *Arch Toxicol.* 91(9): 2967-3010.

[18]. Wang W., Martin Jarett C., Fan X., Han J., Luo Z. & Sun L. (2012). Silica nanoparticles and frameworks from rice husk biomass. *ACS Appl Mater Interfaces.* 4(2): 977-981.

[19]. Gu S., Zhou J., Yu C., Luo Z., Wang Q. & Shi Z.

- (2015). A novel two-staged thermal synthesis method of generating nanosilica from rice husk via pre-pyrolysis combined with calcination. *Ind Crops Prod.* 65: 1-6.
- [20]. Adebisi J. A., Agunsoye J. O., Bello S. A., Haris M., Ramakokovhu M. M., Daramola M. O. & Hassan S. B. (2020). Green production of silica nanoparticles from maize stalk. *Part Sci Technol.* 38(6): 667-675.
- [21]. Abdelrhim A. S., Mazrou Y. S. A. & Nehela Y. (2021). Silicon dioxide nanoparticles induce innate immune responses and activate antioxidant machinery in wheat against *Rhizoctonia solani*. *Plants.* 10(12): 2758.
- [22]. Albalawi M. A., Abdelaziz A. M., Attia M. S., Saied E., Elganzory H. H. & Hashem A. H. (2022). Mycosynthesis of silica nanoparticles using *Aspergillus niger*: Control of *Alternaria solani* causing early blight disease, induction of innate immunity and reducing of oxidative stress in eggplant. *Antioxidants.* 11(12): 2323.
- [23]. Park H. J., Sung H. K., Hwa J. K. & Seong H. C. (2006). A new composition of nanosized silica-silver for control of various plant diseases. *Plant Pathol J.* 22(3): 295-302.
- [24]. Baka Z. A. & El-Zahed M. M. (2022). Antifungal activity of silver/silicon dioxide nanocomposite on the response of faba bean plants (*Vicia faba* L.) infected by *Botrytis cinerea*. *Biores Bioprocess.* 9(1): 102.
- [25]. Khan M., Siddiqui Z. A., Parveen A., Khan A. A., Moon I. S. & Alam M. (2022). Elucidating the role of silicon dioxide and titanium dioxide nanoparticles in mitigating the disease of the eggplant caused by *Phomopsis vexans*, *Ralstonia solanacearum*, and root-knot nematode *Meloidogyne incognita*. *Nanotech Reviews.* 11(1): 1606-1619.
- [26]. Ayoub H. A., Khairy M., Rashwan F. A. & Abdel-Hafez H. F. (2017). Synthesis and characterization of silica nanostructures for cotton leaf worm control. *J Nanostructure Chem.* 7(2): 91-100.
- [27]. Saw G., Nagdev P., Jeer M. & Murali-Baskaran R. K. (2023). Silica nanoparticles mediated insect pest management. *Pestic Biochem Physiol.* 194: 105524.
- [28]. Thabet A. F., Boraie H. A., Galal O. A., El-Samahy F. M., Mousa K. M., Zhang Y. Z., Tuda M., Helmy E. A., Wen J. & Nozaki T. (2021). Silica nanoparticles as pesticide against insects of different feeding types and their non-target attraction of predators. *Sci Rep.* 11(1): 14484.
- [29]. Naidu S., Pandey J., Mishra L. C., Chakraborty A., Roy A., Singh I. K. & Singh A. (2023). Silicon nanoparticles: Synthesis, uptake and their role in mitigation of biotic stress. *Ecotoxicol Environ Saf.* 255: 114783.
- [30]. Adrees M., Khan Z. S., Rehman M. Z., Rizwan M. & Ali S. (2022). Foliar spray of silicon nanoparticles improved the growth and minimized cadmium (Cd) in wheat under combined Cd and water-limited stress. *Environ Sci Pollut Res.* 29(51): 77321-77332.
- [31]. Buchman J. T., Elmer W. H., Ma C., Landy K. M., White J. C. & Haynes C. L. (2019). Chitosan-coated mesoporous silica nanoparticle treatment of *Citrullus lanatus* (Watermelon): Enhanced fungal disease suppression and modulated expression of stress-related genes. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering.* 7(24): 19649-19659.
- [32]. Wang L., Pan T., Gao X., An J., Ning C., Li S. & Cai K. (2022). Silica nanoparticles activate defense responses by reducing reactive oxygen species under *Ralstonia solanacearum* infection in tomato plants. *NanoImpact.* 28: 100418.
- [33]. Rashad Y., El-Sharkawy H., Belal B., Abdel Razik Elsayed S. & Galilah A. (2021). Silica nanoparticles as a probable anti-oomycete compound against downy mildew, and yield and quality enhancer in grapevines: Field evaluation, molecular, physiological, ultrastructural, and toxicity investigations. *Front Plant Sci.* 12: 763365.
- [34]. Wang Z., Zhu W., Chen F., Yue L., Ding Y., Xu H., Rasmann S. & Xiao Z. (2021). Nanosilicon enhances maize resistance against oriental armyworm (*Mythimna separata*) by activating the biosynthesis of chemical defenses. *Sci Total Environ.* 778: 146378.
- [35]. Suriyaprabha R., Karunakaran G., Kavitha K., Yuvakkumar R., Rajendran V. & Kannan N. (2014). Application of silica nanoparticles in maize to enhance fungal resistance. *IET Nanobiotechnol.* 8(3): 133-137.
- [36]. El-Shetehy M. & Moradi A. (2021). Silica nanoparticles enhance disease resistance in Arabidopsis plants. *Nature Nanotech.* 16(3): 344-353.
- [37]. Zhang J., Kothalawala S. & Yu C. (2023). Engineered silica nanomaterials in pesticide delivery: Challenges and perspectives. *Environmental Pollution.* 320: 121045.
- [38]. Bilal M., Xu C., Cao L., Zhao P., Cao C., Li F. & Huang Q. (2020). Indoxacarb-loaded fluorescent mesoporous silica nanoparticles for effective control of *Plutella xylostella* L. with decreased detoxification enzymes activities. *Pest Manag Sci.* 76(11): 3749-3758.
- [39]. Abdelrahman T. M., Qin X., Li D., Senosy I. A., Mmby M., Wan H., Li J. & He S. (2021). Pectinase-responsive carriers based on mesoporous silica nanoparticles for improving the translocation and fungicidal activity of prochloraz in rice plants. *Chem Engineer J.* 404: 126440.
- [40]. Zhao P., Cao L., Ma D., Zhou Z., Huang Q. & Pan C. (2018). Translocation, distribution and degradation of prochloraz-loaded mesoporous silica nanoparticles in cucumber plants. *Nanoscale.* 10(4): 1798-1806.