

NANOCOMPOZIT QUANG XÚC TÁC $\text{CuI/Cu}^{2+}\text{-TiO}_2$ ĐỊNH HƯỚNG ỨNG DỤNG TRONG KHÁNG NẤM *MAGNAPORTHE ORYZAE* GÂY BỆNH ĐẠO ÔN TRÊN LÚA

TRƯƠNG THỊ HẠNH

Viện Tiên tiến Khoa học và Công nghệ, Trường Đại học Văn Lang, TP. Hồ Chí Minh

Science and Technology Advanced Institute, Van Lang University

Email: hanh.truong@vlu.edu.vn

Ngày nhận bài: 1/7/2026

Ngày sửa bài: 14/7/2026

Ngày duyệt đăng bài: 28/7/2026

Tóm tắt:

Trong công trình trước (Trương Thị Hạnh, 2026), chúng tôi đã tổng hợp và khảo sát các đặc trưng nanocompozit $\text{CuI/Cu}^{2+}\text{-TiO}_2$. Trên cơ sở đó, nghiên cứu này làm rõ mối tương quan giữa năng lượng vùng cấm (E_g), hoạt tính quang xúc tác và hiệu quả kháng nấm của vật liệu. Giá trị E_g được xác định bằng phương pháp Tauc. Kết quả cho thấy, khi hàm lượng Cu tăng từ 2,73% lên 9,53%, E_g giảm từ 2,90 xuống 2,60 eV, đồng thời mép hấp thụ quang dịch chuyển từ 428 lên 477 nm. Dưới chiếu xạ đèn LED, mẫu 3CuT3 đạt hiệu suất kháng nấm *Magnaporthe oryzae* cao nhất (91,55% ở 500 ppm sau 10 ngày), cao hơn 1CuT1 (78,22%) và 2CuT2 (83,55%). Sự hiện diện của cặp oxy hóa-khử $\text{Cu}^+/\text{Cu}^{2+}$ góp phần thu hẹp E_g , tăng hấp thụ ánh sáng khả kiến, cải thiện sự tách cặp e^-/h^+ và thúc đẩy hình thành gốc oxy hoạt hóa (ROS), nâng cao hiệu quả quang xúc tác. Kết quả cho thấy, tiềm năng ứng dụng của $\text{CuI/Cu}^{2+}\text{-TiO}_2$ trong kiểm soát bệnh đạo ôn trên lúa theo hướng an toàn và bền vững.

Từ khóa: quang xúc tác, nanocompozit $\text{CuI/Cu}^{2+}\text{-TiO}_2$, năng lượng vùng cấm, *Magnaporthe oryzae*

$\text{CuI/Cu}^{2+}\text{-TiO}_2$ photocatalytic nanocomposites for antifungal applications against *Magnaporthe oryzae* - the causal agent of rice blast disease

Abstract:

Building on previous synthesis and characterization of $\text{CuI/Cu}^{2+}\text{-TiO}_2$ nanocomposites, this study examines the relationship between band-gap energy (E_g), photocatalytic activity, and antifungal performance. E_g values were determined using the Tauc method. Increasing Cu content from 2.73% to 9.53% reduced E_g from 2.90 to 2.60 eV and shifted the absorption edge from 428 to 477 nm. Under LED irradiation, sample 3CuT3 showed the highest antifungal activity against *Magnaporthe oryzae*, achieving 91.55% inhibition at 500 ppm after 10 days, compared with 78.22% for 1CuT1 and 83.55% for 2CuT2. The $\text{Cu}^+/\text{Cu}^{2+}$ redox couple enhances visible-light absorption, electron-hole separation, and reactive oxygen species generation. The findings demonstrate the potential of $\text{CuI/Cu}^{2+}\text{-TiO}_2$ for sustainable rice blast control.

Keywords: photocatalysis, $\text{CuI/Cu}^{2+}\text{-TiO}_2$ nanocomposites, band-gap energy, *Magnaporthe oryzae*

1. Đặt vấn đề

Lúa gạo là cây lương thực chủ lực của hơn một nửa dân số thế giới và giữ vai trò đặc biệt quan trọng đối với an ninh lương thực cũng như nền kinh tế Việt Nam. Tuy nhiên, bệnh đạo ôn do nấm *Magnaporthe oryzae* gây ra vẫn là một trong những bệnh hại nghiêm trọng nhất, có thể làm giảm năng suất lúa tới 50% (Zhang et al. 2024, Yang et al. 2024). Trong khi đó, việc lạm dụng thuốc bảo vệ thực vật hóa học gây nhiều tác động bất lợi đến môi trường và sức khỏe con người. Vì vậy, nghiên cứu và phát triển các vật liệu tiên tiến, đặc biệt là vật liệu nano có hoạt tính quang xúc tác, đang được quan tâm như một giải pháp thay thế an toàn, thân thiện với môi trường và hướng tới nền nông nghiệp bền vững.

2. Tổng quan và phương pháp nghiên cứu

2.1. Tổng quan nghiên cứu

Việc sử dụng rộng rãi thuốc bảo vệ thực vật và thuốc trừ nấm hóa học đã gây ra nhiều tác động tiêu cực đến môi trường, làm suy giảm đa dạng sinh học và gia tăng nguy cơ đối với sức khỏe con người. Điều này đặt ra nhu cầu cấp thiết về các giải pháp kiểm soát dịch hại an toàn và bền vững hơn (Zhou et al. 2025). Trong số các giải pháp mới, vật liệu quang xúc tác bán dẫn, đặc biệt là TiO_2 , được quan tâm nhờ tính ổn định quang hóa, giá thành thấp, thân thiện với môi trường và khả năng tạo các gốc oxy hoạt hóa (ROS) để tiêu diệt vi sinh vật. Mặc dù sở hữu nhiều ưu điểm, khả năng hấp thụ ánh sáng khả kiến của vật liệu vẫn chưa cao. Do đó, các chiến lược như pha tạp kim loại và thiết kế vật liệu nanocompozit đã được nghiên cứu rộng rãi để tăng cường hoạt tính quang xúc tác. (Zhao et al. 2020, Idrees et al. 2024).

Trong các hệ vật liệu này, TiO_2 biến tính bằng đồng (Cu) được đánh giá cao nhờ khả năng kháng nấm hiệu quả đồng thời cung cấp vi lượng cần thiết cho cây trồng. Hoạt tính kháng nấm của đồng chủ yếu đến từ cặp ion $\text{Cu}^+/\text{Cu}^{2+}$, thúc đẩy hình thành ROS, gây tổn thương màng tế bào và ức chế các quá trình trao đổi chất của nấm (Ramos-Zuniga et al. 2023). Tuy nhiên, phần lớn các nghiên cứu trước đây chỉ tập trung vào hệ $\text{Cu}^{2+}-\text{TiO}_2$, trong khi vai trò của chu trình oxy hóa-khử $\text{Cu}^+/\text{Cu}^{2+}$ trong hệ dị thể $\text{CuI}/\text{Cu}^{2+}-\text{TiO}_2$ với sự tách điện tích, tăng cường tạo ROS và nâng cao hoạt tính kháng nấm vẫn chưa được làm sáng tỏ đầy đủ (Qian et al. 2025, Li et al. 2023).

Trên cơ sở các đặc trưng hóa lý của hệ dị thể $\text{CuI}/\text{Cu}^{2+}-\text{TiO}_2$, nghiên cứu này đánh giá ảnh hưởng của thành phần nanocompozit, đặc biệt là hàm lượng Cu ($\text{Cu}^+/\text{Cu}^{2+}$), đến hoạt tính kháng nấm *Magnaporthe oryzae*. Đồng thời, mối tương quan giữa năng lượng vùng cấm (Eg) của vật liệu và hiệu quả kháng nấm cũng được phân tích nhằm làm rõ vai trò của Cu trong việc nâng cao hoạt tính quang xúc tác.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

2.2.1. Tính năng lượng vùng cấm

Năng lượng vùng cấm (Eg) được xác định từ phổ UV-Vis bằng phương pháp đồ thị Tauc. Dữ liệu UV-Vis được chuyển đổi thành năng lượng photon ($h\nu$) và hệ số hấp thụ (α), sau đó tính giá trị Tauc $(\alpha h\nu)^{1/n}$, với $n = 2$ cho chuyển tiếp trực tiếp và $n = 1/2$ cho gián tiếp. Giá trị năng lượng vùng cấm (Eg) được xác định bằng cách hồi quy tuyến tính trên vùng tuyến tính của đồ thị Tauc và kéo dài đường hồi quy đến khi cắt trục năng lượng photon ($h\nu$). Giao điểm của đường hồi quy với trục hoành được xác định là giá trị Eg.

2.2.2. Đánh giá hoạt tính kháng nấm của keo $\text{CuI}/\text{Cu}^{2+}-\text{TiO}_2$ đối với *Magnaporthe oryzae*

Chủng nấm *Magnaporthe oryzae* được cung cấp bởi Phòng Công nghệ Vi sinh, Trung tâm Công nghệ Sinh học TP. Hồ Chí Minh và được nuôi cấy trên môi trường PDA (200 g/L dịch chiết khoai tây, 20 g/L glucose và 20 g/L agar). Sau khi môi trường được làm nguội đến khoảng 50°C , keo $\text{CuI}/\text{Cu}^{2+}-\text{TiO}_2$ được bổ sung ở các nồng độ 0, 20, 40, 60, 80, 100, 300 và 500 ppm, trộn đều và rót vào đĩa Petri vô trùng (90

$\times 15$ mm). Mỗi đĩa được cấy một khoanh nấm đường kính 6 mm lấy từ rìa khuẩn lạc đang sinh trưởng và rồi chiếu sáng bằng đèn LED trắng (400-700 nm, 20-25 mW.cm⁻²) trong 30 phút.

Các đĩa sau đó được ủ ở nhiệt độ phòng trong 10 ngày và đường kính khuẩn lạc được ghi nhận hằng ngày. Tỷ lệ ức chế sinh trưởng của nấm (E, %) được tính theo công thức (Perumal et al. 2021):

$$(\%) = \frac{(d_c - d_t)}{d_c} \times 100 \quad (1)$$

trong đó d_c là đường kính nấm của mẫu đối chứng và d_t là đường kính nấm của mẫu xử lý bằng CuI/ Cu²⁺-TiO₂.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Đặc tính quang học của nanocompozit CuI/Cu²⁺-TiO₂

Như trình bày trong Bảng 1, hàm lượng Cu và I tăng tỷ lệ thuận với nồng độ tiền chất Cu²⁺ và I⁻, chứng tỏ CuI đã tích hợp thành công vào nền Cu²⁺-TiO₂. Cụ thể, lượng Cu tăng từ 2,73% lên 4,04% và 9,52% đối với các mẫu ký hiệu là 1CuT1, 2CuT2 và 3CuT3, ứng với lượng tổng Cu²⁺ là 0,02; 0,04 và 0,06 mol trong 25 g nanocompozit tổng hợp. Tương tự, lượng I tăng từ 0,64% lên 1,94% và 8,03%, phù hợp với sự gia tăng lượng tiền chất KI từ 0,01; 0,02 đến 0,03 mol. Kết quả xác nhận sự hình thành nanocompozit CuI/ Cu²⁺-TiO₂, tạo nền tảng cấu trúc ổn định cho hoạt tính quang xúc tác của vật liệu.

Phổ DRS UV-Vis của TiO₂ và các nanocompozit CuI/Cu²⁺-TiO₂ được ghi nhận trong khoảng 200-800 nm (Hình 1) để xác định năng lượng vùng cấm quang học (Eg). Mép hấp thụ dời đỏ từ khoảng 407 nm (TiO₂) lên 477 nm (3CuT3), cho thấy khả năng hấp thụ ánh sáng khả kiến tăng theo hàm lượng Cu. Giá trị Eg được tính theo phương pháp đồ thị Tauc dựa trên phương trình (Hanh et al., 2025):

$$(\alpha h\nu)^{1/n} = B(h\nu - E_g) \quad (2)$$

Trong đó, $n = 1/2$ tương ứng với chuyển tiếp gián tiếp đặc trưng của TiO₂. Giá trị Eg của TiO₂ là 3,05 eV (Hình 2A), phù hợp với giá trị của TiO₂ pha anatase. Khi hàm lượng Cu tăng (2,73; 4,04 và 9,52%; Bảng 1), giá trị Eg giảm dần từ 2,90 eV (1CuT1) xuống 2,70 eV (2CuT2) và 2,60 eV (3CuT3) (Hình 2B-2D), cho thấy sự mở rộng khả năng hấp thụ ánh sáng vùng khả kiến.

Để làm sáng tỏ hoạt tính quang xúc tác của nanocompozit bán dẫn, cần ước tính thế của vùng dẫn (CB) và thế vùng hóa trị (VB). Các thông số này có thể được xác định dựa trên các mối quan hệ thực nghiệm đã được thiết lập (Hanh et al. 2025):

$$E_{VB} = X_m - E_e + 1/2E_g \quad (3)$$

$$E_{CB} = E_{VB} - E_g \quad (4)$$

Với X_m là độ âm điện tuyệt đối của chất bán dẫn; E_e là năng lượng của electron tự do trên thang thế hydro chuẩn (4,5 eV); và E_g là năng lượng vùng cấm. Giá trị X_m được xác định từ trung bình hình học của độ âm điện của các nguyên tố cấu thành, trong đó mỗi giá trị được tính theo tỷ lệ nguyên tử của nguyên tố tương ứng trong vật liệu (Clark-Carter, 2010).

Bảng 1. Thành phần của nanocompozit 1CuT1, 2CuT2 và 3CuT3

Nguyên tố	1CuT1		2CuT2		3CuT3	
	Khối lượng (%)	Nguyên tử (%)	Khối lượng (%)	Nguyên tử (%)	Khối lượng (%)	Nguyên tử (%)
O	37,72 ± 0,21	64,85 ± 0,36	36,66 ± 0,21	64,23 ± 0,36	31,19 ± 0,18	60,30 ± 0,35

Ti	58,91 ± 0,47	33,83 ± 0,27	57,36 ± 0,47	33,56 ± 0,28	51,26 ± 0,45	33,11 ± 0,29
Cu	2,73 ± 0,09	1,18 ± 0,04	4,04 ± 0,11	1,78 ± 0,05	9,52 ± 0,15	4,63 ± 0,07
I	0,64 ± 0,13	0,14 ± 0,03	1,94 ± 0,16	0,43 ± 0,04	8,03 ± 0,25	1,96 ± 0,06

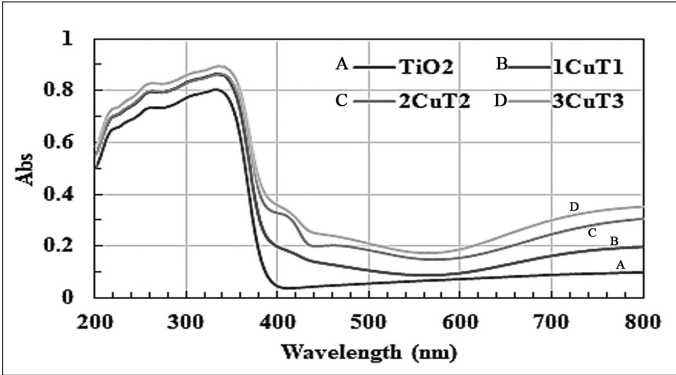
Độ âm điện tuyệt đối của nguyên tố theo Mulliken (χ) được xác định bằng giá trị trung bình của năng lượng ion hóa thứ nhất và ái lực electron (NCBI, 2025a, NCBI, 2025b):

$$\chi_m = \frac{E_{\text{ionization}} + E_{\text{electron affinity}}}{2} \tag{5}$$

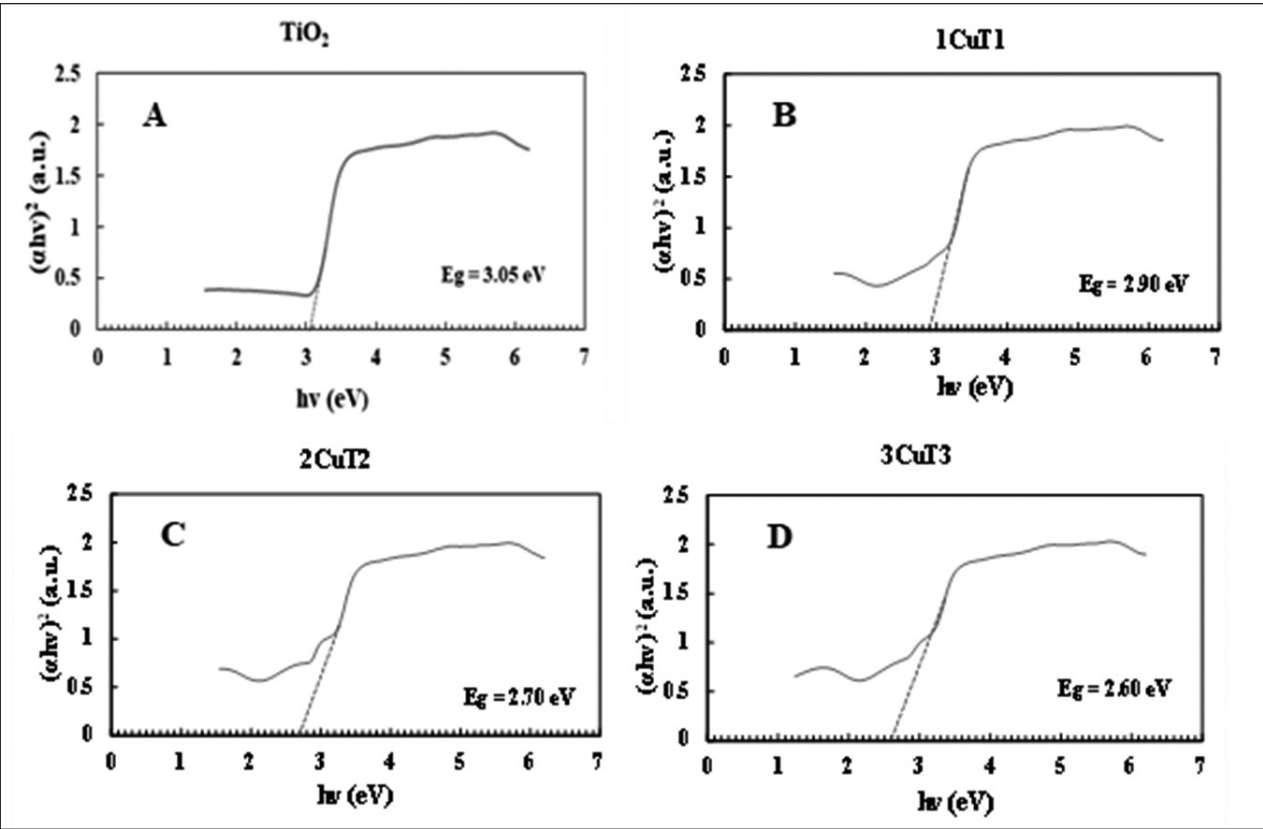
Giá trị (χ_m , E_{CB} and E_{VB} được tính từ năng lượng vùng cấm của TiO_2 ($E_g = 3,05 \text{ eV}$) và CuI ($E_g = 3,10 \text{ eV}$) (Lee et al., 2021). Sự pha tạp Cu^{2+} vào TiO_2 tạo ra khuyết tật oxy, giúp tăng khả năng hấp thụ ánh sáng và thúc đẩy quá trình vận chuyển điện tích. Khi tiếp xúc, CuI và TiO_2 hình thành dị thể với điện trường nội tại nơi bề mặt tiếp giáp, giúp tăng cường sự tách cặp electron-lỗ trống quang sinh.

Từ các phương trình (3)-(5), E_{CB} , E_{VB} của TiO_2 được xác định lần lượt là $-0,22$ và $+2,83 \text{ eV}$, trong khi của CuI là $-0,55$ và $+2,55 \text{ eV}$. Như vậy, thế vùng dẫn của CuI ($E_{CB} = -0,55\text{eV}$) âm hơn thế khử

Hình 1. Phổ UV-Vis DRS của TiO_2 và nanocomposit $\text{CuI/Cu}^{2+}\text{-TiO}_2$



Hình 2. Đồ thị Tauc và năng lượng vùng cấm của TiO_2 , 1CuT1 , 2CuT2 và 3CuT3



$O_2/\bullet O_2^-$ (- 0,33 eV), cho phép electron quang sinh khử O_2 tạo gốc $\bullet O_2^-$. Đồng thời, thế vùng hóa trị của TiO_2 ($E_{VB} = +2,83$ eV) dương hơn thế oxy hóa $H_2O/\bullet OH$ (+2,38 eV), giúp lỗ trống quang sinh oxy hóa $H_2O/OH^\cdot$ tạo gốc $\bullet OH$.



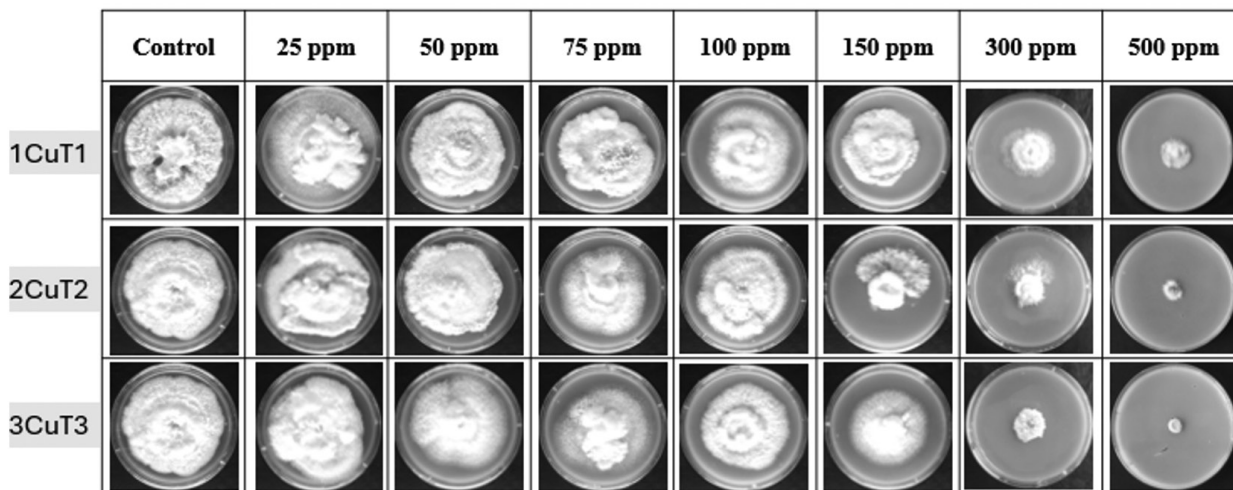
Do đó, các gốc $\bullet O_2^-$ và $\bullet OH$ được hình thành hiệu quả trong quá trình quang xúc tác, góp phần nâng cao đáng kể sự phân hủy các chất ô nhiễm và hoạt tính sinh học của vật liệu.

3.2. Hiệu lực kháng nấm của nanocompozit $CuI/Cu^{2+}-TiO_2$

Hoạt tính kháng nấm của các nanocompozit $CuI/Cu^{2+}-TiO_2$ đối với *Magnaporthe oryzae*, tác nhân gây bệnh đạo ôn lúa, được đánh giá trên ba mẫu 1CuT1, 2CuT2 và 3CuT3 với hàm lượng Cu và I tăng dần (Bảng 1). Như thể hiện ở Hình 3, hệ sợi nấm trên đĩa đối chứng (Control) phát triển mạnh và lan kín bề mặt đĩa, trong khi sự phát triển của nấm bị ức chế rõ rệt ở các mẫu chứa $CuI/Cu^{2+}-TiO_2$. Mức độ ức chế tăng theo nồng độ vật liệu, thể hiện qua sự giảm dần đường kính hệ sợi nấm; ở nồng độ 500 ppm, hệ sợi phát triển rất ít và môi trường nuôi cấy chuyển sang màu nâu nhạt.

Đáng chú ý, ở nồng độ 500 ppm, đường kính khuẩn lạc của *M. oryzae* trên các mẫu 1CuT1, 2CuT2 và 3CuT3 lần lượt là 16, 12 và 7 mm, thấp hơn đáng kể so với 75 mm của mẫu đối chứng. Hiệu suất ức chế tính theo Công thức (1) đạt 78,66%, 84,00% và 90,66% tương ứng với các mẫu 1CuT1, 2CuT2 và 3CuT3, kết quả này cho thấy, hoạt tính kháng nấm được cải thiện khi hàm lượng Cu^+/Cu^{2+} trong vật liệu tăng lên.

Hình 3. Ảnh hưởng của nanocompozit $CuI/Cu^{2+}-TiO_2$ đến sự tăng trưởng của *M. oryzae* ở các nồng độ 25-500 ppm sau 10 ngày nuôi cấy



Nanocompozit $CuI/Cu^{2+}-TiO_2$ thể hiện hoạt tính kháng nấm vượt trội dưới chiếu xạ đèn LED. Ion Cu^+/Cu^{2+} giải phóng từ vật liệu có thể phá hủy thành và màng tế bào nấm, đồng thời gây rối loạn hoạt động enzyme, hô hấp tế bào và cân bằng oxy hóa-khử (Chang et al., 2021). Dưới chiếu xạ ánh sáng khả kiến, vật liệu thúc đẩy sự hình thành các gốc oxy hoạt hóa (ROS), từ đó góp phần nâng cao hoạt tính kháng nấm của vật liệu (Wang et al., 2024).

5. Kết luận

Sự kết hợp của hệ Cu^+/Cu^{2+} giúp tăng cường khả năng hấp thụ ánh sáng khả kiến và cải thiện hiệu quả tách cặp điện tử-lỗ trống (e^-/h^+). Hoạt tính kháng nấm của nanocompozit $CuI/Cu^{2+}-TiO_2$ chủ yếu được quy

cho tác động cộng hợp giữa chu trình oxy hóa-khử $\text{Cu}^+/\text{Cu}^{2+}$ và sự hình thành các gốc oxy hoạt hóa (ROS), chủ yếu là $\bullet\text{O}_2^-$ và $\bullet\text{OH}$, từ đó tổn thương tế bào nấm *M. oryzae*.

Nhìn chung, nanocompozit $\text{CuI}/\text{Cu}^{2+}\text{-TiO}_2$ là vật liệu quang xúc tác đáp ứng ánh sáng khả kiến với hoạt tính kháng nấm cao, cho thấy tiềm năng ứng dụng trong phát triển chế phẩm bảo vệ thực vật nano phục vụ nền nông nghiệp bền vững. Trong tương lai, cần tiếp tục đánh giá độ ổn định, độ an toàn môi trường và hiệu quả của vật liệu trong điều kiện đồng ruộng, đồng thời làm sáng tỏ hơn cơ chế kháng nấm của hệ nanocompozit này ■

TÀI LIỆU THAM KHẢO:

- Hạnh T.T. (2026). Đặc trưng hóa lý của nanocompozit $\text{CuI}/\text{Cu}^{2+}\text{-TiO}_2$.
 Tạp Chí Công Thương, số 9, Tr. 362-366.
- Chang T., Babu R. P., Zhao W., Johnson C. M., Hedstrom P., Odnevall I., et al. (2021). High-resolution microscopical studies of contact killing mechanisms on copper-based surfaces. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13(41), 49402-49413.
- Clark-Carter D. (2010). Measures of central tendency. In: *International Encyclopedia of Education* 3rd ed. p. 264-266.
- Hanh T.T., Tho T.P., Hai V.P. (2025). Enhanced photocatalytic activity of Ag-doped WO_3 for antibiotics and bacteria. *Aquaculture Research*, 2025, 6634836.
- Hanh T.T., Tho T.P., Nhi D.B., Ha T.L., Thuan C.N. (2025). Design of AgI/BiVO_4 heterostructures for photocatalytic antibiotic removal and antimicrobial action. *Materials Research Express*, 12, 085003.
- Idrees I., Razzaq A., Zafar M., Umer A., Mustafa F., Rehman F., et al. (2024). Silver (Ag)-doped graphitic carbon nitride ($\text{g-C}_3\text{N}_4$) photocatalyst for enhanced degradation of ciprofloxacin (CIP) under visible light irradiation. *Arabian Journal of Chemistry*, 17, 105615.
- Lee J. H., Lee B. H., Kang J., Diware M., Jeon K., et al. (2021). Characteristics and electronic band alignment of a transparent $\text{P-CuI}/\text{N-SiZnSnO}$ heterojunction diode with a high rectification ratio. *Nanomaterials*, 11(5), 1237.
- Li L., Chen X., Quan X., Qiu F., Zhang X. (2023). Synthesis of CuOx/TiO_2 photocatalysts with enhanced photocatalytic performance. *ACS Omega*, 8(2), 2723-2732.
- National Center for Biotechnology Information (NCBI). (2025a). Ionization energy in the periodic table of elements [Internet]. PubChem. Available from: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/ptable/ionization-energy/>
- National Center for Biotechnology Information (NCBI). (2025b). Electron affinity in the periodic table of elements [Internet]. PubChem. Available from: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/ptable/electron-affinity/>
- Perumal A.B., Li X., Su Z., He Y. (2021). Preparation and characterization of a novel green tea essential oil nanoemulsion and its antifungal mechanism of action against *Magnaporthe oryzae*. *Ultrasonics Sonochemistry*, 76, 105649.
- Qian H., Yuan B., Liu Y., Wang L., Zhu R., Dong P. (2025). Effect of Cu valence states on conduction band position and reduction selectivity of TiO_2 -based heterojunction photocatalysts. *iScience* 28, 112697.
- Ramos-Zuniga J., Bruna N., Pérez-Donoso J. M. (2023). Toxicity mechanisms of copper nanoparticles and copper surfaces on bacterial cells and viruses. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(13), 10503.
- Wang R. X., Wang Z. H., Sun Y. D., Wang L. L., Li M., Liu Y.T., et al. (2024). Molecular mechanism of plant response to copper stress: A review. *Environmental and Experimental Botany*, 218, 105590.
- Yang X., Yan S., Li G., Li Y., Li J., Cui Z., et al. (2024). Rice *Magnaporthe oryzae* interactions in resistant and susceptible rice cultivars under panicle blast infection based on defence-related enzyme activities and metabolomics. *PLoS One* 19(3), e0299999.
- Zhang H., Yang J., Liu M., Xu X., Yang L., Liu X., et al. (2024). Early molecular events in the interaction between *Magnaporthe oryzae* and rice. *Phytopathology Research*, 6, 9.
- Zhao W., Liu C. (2020). Mesoporous $\text{Cu-Cu}_2\text{O}/\text{TiO}_2$ heterojunction photocatalysts derived from metal-organic frameworks. *RSC Advances* 10, 14550-14555.
- Zhou W., Li M., Achal V. (2025). A comprehensive review on environmental and human health impacts of chemical pesticide usage. *Emerging Contaminants*, 11(1), 100410.