

# MÔ HÌNH HÓA CÁC TÁC ĐỘNG TIỀM ẨN ĐẾN MÔI TRƯỜNG CỦA QUÁ TRÌNH TỔNG HỢP VẬT LIỆU $C_3N_4$ MANG CÁC-BON CHẤM LƯỢNG TỬ TỪ CHITOSAN

ĐẶNG HOA LƯ<sup>1</sup>, NGÔ THỊ PHƯƠNG NAM<sup>1</sup>, TRẦN TRUNG KIÊN<sup>1</sup>, NGUYỄN VIỆT THẮNG<sup>1</sup>, NGUYỄN THỊ PHƯƠNG THẢO<sup>1</sup>, NGUYỄN LÊ MINH TRÍ<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Viện Môi trường và Tài nguyên, Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh

## Tóm tắt

Nghiên cứu sử dụng phương pháp phân tích dòng vật chất và công cụ WAR để tính toán các chỉ số môi trường cho 4 trường hợp và 3 dạng nguồn năng lượng khác nhau được khảo sát của quá trình tổng hợp  $C_3N_4$  mang CQDs từ chitosan. Kết quả cho thấy, vật liệu  $C_3N_4$  mang CQDs và các hóa chất được sử dụng trong quá trình tổng hợp không có khả năng gây ra hiện tượng ấm lên toàn cầu. Tuy nhiên, nguồn năng lượng được sử dụng trong quá trình tổng hợp lại có khả năng gây ra hiện tượng ấm lên toàn cầu, hiện tượng axit hóa và oxy hóa quang hóa. Quá trình chuyển từ than đá sang dầu mỏ và khí tự nhiên góp phần làm giảm khả năng gây ra hiện tượng ấm lên toàn cầu của quá trình tổng hợp.

**Từ khóa:** Các-bon chấm lượng tử,  $C_3N_4$ , chitosan, axit hóa, phân tích dòng vật chất.

**Ngày nhận bài:** 29/7/2025; **Ngày sửa chữa:** 5/8/2025; **Ngày duyệt đăng:** 20/8/2025.

## Modelling potential environmental impacts of the synthesis of $C_3N_4$ loaded with carbon quantum dots derived from chitosan

### Abstract

The study employed material flow analysis (SFA) and the WAR (Waste Reduction Algorithm) tool to calculate potential environmental impact indexes for four scenarios and three different energy sources in the synthesis of chitosan-derived-CQDs-loaded  $C_3N_4$ . The results showed that the CQDs-loaded  $C_3N_4$  material and the chemicals used in the synthesis do not potentially contribute to global warming. However, the energy sources used during the synthesis process have the potential to cause global warming, acidification, and photochemical oxidation. Transitioning from coal to petroleum and natural gas as an energy source for the synthesis of CQDs-loaded  $C_3N_4$  helps to reduce potential contribution of the process to global warming.

**Keywords:** carbon quantum dots,  $C_3N_4$ , chitosan, acidification, material flow analysis.

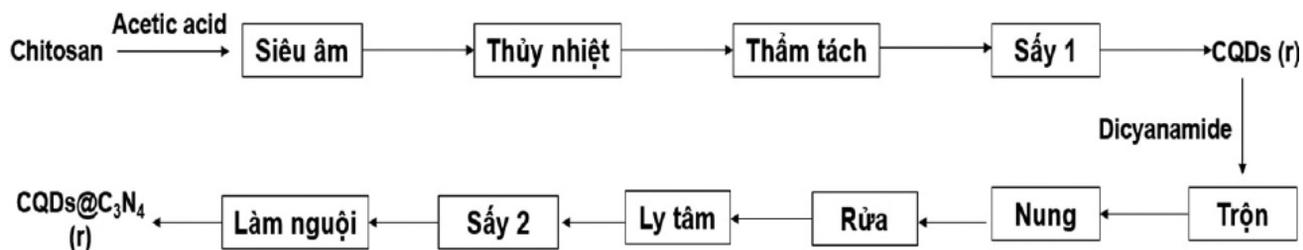
**JEL Classifications:** N50, Q53, Q54.

### 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Chitosan là một loại polymer sinh học có nguồn gốc từ chitin, một hợp chất tự nhiên có nhiều trong vỏ tôm, cua, côn trùng và thành tế bào của một số loại nấm. Nhờ tính chất phân hủy sinh học, không độc hại và tương thích sinh học cao, chitosan đang trở thành một vật liệu quan trọng trong nhiều lĩnh vực, từ y học, nông nghiệp đến xử lý nước và công nghệ thực phẩm (2017). Chitosan được tạo ra từ chitin thông qua quá trình khử acetyl, giúp thay đổi cấu trúc hóa học của nó, làm cho chitosan có thể hòa tan trong dung dịch axit yếu và có nhiều ứng dụng thực tiễn. Chitosan được sử dụng làm chất hấp phụ hiệu quả trong xử lý nước, bảo quản thực phẩm và hỗ trợ điều trị y học. Trong lĩnh vực y học, chitosan được sử dụng để sản xuất băng gạc y tế giúp cầm máu nhanh chóng và kích thích tái tạo mô, từ đó giúp vết thương lành

nhanh hơn (Li et al., 2025; Zhang et al., 2025). Ngoài ra, chitosan còn được nghiên cứu để tạo ra hệ thống dẫn truyền thuốc nhờ khả năng kiểm soát tốc độ giải phóng thuốc trong cơ thể (Sharif et al., 2018). Trong công nghiệp thực phẩm, chitosan được sử dụng để tạo màng bọc thực phẩm giúp kéo dài thời gian bảo quản nhờ khả năng kháng khuẩn và chống oxy hóa (Cazón and Vázquez, 2019; Flórez et al., 2022). Trong lĩnh vực xử lý nước, chitosan được ứng dụng rộng rãi để loại bỏ kim loại nặng, thuốc nhuộm và các chất ô nhiễm khác. Bên cạnh đó, chitosan còn là nguồn nguyên liệu đầu vào của các quá trình tổng hợp vật liệu (Islam et al., 2020).

Trong bối cảnh phát triển vật liệu mới thân thiện với môi trường, các-bon chấm lượng tử (CQDs) đang thu hút sự quan tâm lớn nhờ những đặc tính vượt trội như khả năng phát quang mạnh, kích thước nano, khả



Hình 1. Quy trình tổng hợp vật liệu  $C_3N_4$  mang CQDs từ chitosan

năng dẫn điện tốt và tính tương thích sinh học cao. CQDs là vật liệu nano có cấu trúc các-bon với kích thước nhỏ hơn 10 nm được tổng hợp các nguồn các-bon có nguồn gốc tự nhiên khác nhau như than đá, cây cỏ, lá, vỏ, rễ cây (Ahmed et al., 2025). Tuy nhiên, quy trình tổng hợp CQDs truyền thống thường sử dụng nguồn nguyên liệu hóa thạch và các hóa chất độc hại, dẫn đến những ảnh hưởng tiêu cực đến môi trường. Do đó, chitosan có nguồn gốc từ vỏ tôm đã được sử dụng làm nguồn nguyên liệu thân thiện với môi trường cho quá trình tổng hợp vật liệu CQDs (Song et al., 2018). Nhờ có tính chất quang vượt trội, vật liệu CQDs được ghép cặp cùng các vật liệu xúc tác quang để tạo thành các vật liệu phức hợp nhằm làm cải thiện hoạt tính xúc tác của các vật liệu đó (K, 2024). CQDs có thể được ứng dụng rộng rãi trong lĩnh vực y học, xử lý môi trường, năng lượng và chế tạo cảm biến. Vật liệu  $C_3N_4$  là một vật liệu bán dẫn chỉ bao gồm nguyên tố nitơ và cacbon được ghép với vật liệu CQDs để tạo thành vật liệu phức hợp nhằm giúp cải thiện đáng kể tính chất quang xúc tác và mở rộng khả năng hấp thụ ánh sáng của vật liệu  $C_3N_4$  (Chaluvachar et al., 2025). Nhiều nghiên cứu đã cho thấy khả năng cải thiện hoạt tính xúc tác của CQDs khi ghép CQDs với vật liệu  $C_3N_4$  (Jourshabani et al., 2024; Zhang et al., 2020). Dù các nghiên cứu cho thấy tiềm năng ứng dụng rõ rệt của tổ hợp vật liệu này trong lĩnh vực xúc tác, hiện vẫn còn thiếu các nghiên cứu định lượng cụ thể về tác động môi trường của quy trình tổng hợp vật liệu này. Do đó, nghiên cứu này đề xuất áp dụng mô hình WAR (Waste Reduction Algorithm) kết hợp với phân tích dòng vật chất (SFA) để đánh giá toàn diện các chỉ số môi trường thể hiện các tác động tiềm ẩn (Potential Environmental Impact – PEI) trong quá trình tổng hợp vật liệu  $C_3N_4$  mang CQDs từ chitosan đến môi trường. Điều này sẽ giúp lượng hóa các yếu tố rủi ro liên quan đến độc tính, khả năng gây ra hiệu ứng nhà kính, hiện tượng axit hóa, và các yếu tố khác tác động đến bầu khí quyển của quá trình tổng hợp.

## 2. ĐỐI TƯỢNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

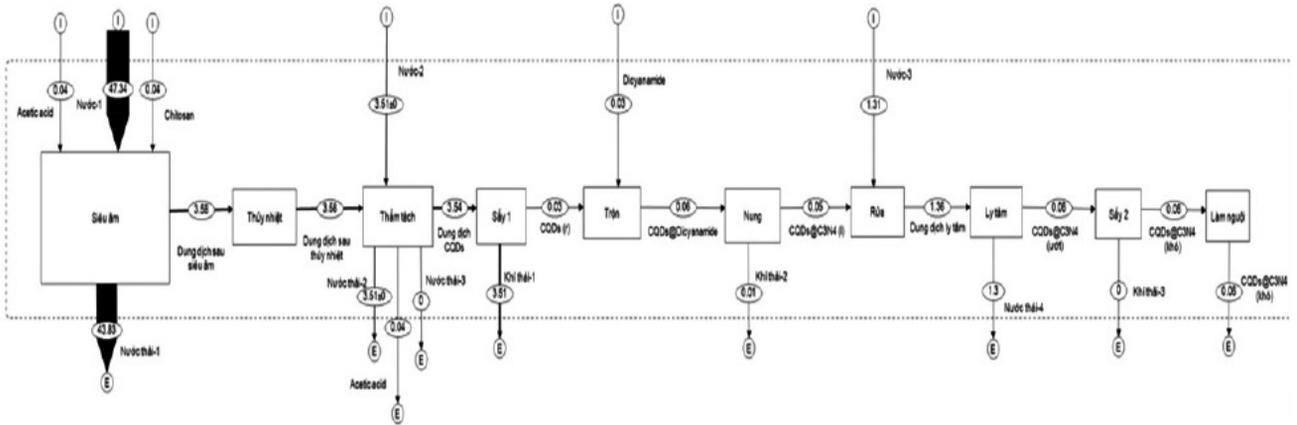
### 2.1. Đối tượng nghiên cứu

Các chỉ số môi trường được xác định từ quy trình tổng hợp vật liệu  $C_3N_4$  mang CQDs (Hình 1) ở quy mô pilot. Trong đó, vật liệu CQDs được tổng hợp dựa trên quá trình thủy nhiệt chitosan với acetic acid (Song et al., 2018). Dung dịch tạo thành sau quá trình thủy nhiệt được thẩm tách bằng màng bán thấm để thu dung dịch CQDs. Sau đó tiến hành sấy chân không để thu được CQDs (r). Để tổng hợp vật liệu  $C_3N_4$  mang CQDs, tiến hành nung hỗn hợp chứa CQDs và Dicyanamide ở 550 oC, rửa vật liệu thu được sau khi nung rồi sấy khô để thu được vật liệu  $C_3N_4$  mang CQDs.

### 2.2. Phương pháp nghiên cứu

#### 2.2.1. Phương pháp đánh giá tác động môi trường

Nghiên cứu này sử dụng công cụ WAR (waste reduction algorithm) để tính toán các chỉ số dùng để đánh giá tác động môi trường tiềm ẩn (PEI) của quá trình tổng hợp vật liệu  $C_3N_4$  mang CQDs bao gồm: Chỉ số rủi ro gây độc tính đối với con người thông qua đường tiêu hóa (HTPI), chỉ số rủi ro gây độc tính đối với con người qua tiếp xúc (HTPE), chỉ số rủi ro gây độc tính đối với môi trường nước (ATP), chỉ số rủi ro gây độc tính đối với môi trường đất (TTP), chỉ số rủi ro gây ra hiện tượng ấm lên toàn cầu (GWP), chỉ số rủi ro gây suy giảm tầng ô-dôn (ODP), chỉ số rủi ro gây ra hiện tượng oxy hóa quang hóa (PCOP), và chỉ số rủi ro gây ra hiện tượng axit hóa (AP). Quá trình tính toán được thực hiện dựa trên lưu lượng của các dòng nguyên vật liệu, về tỉ phần khối lượng của các thành phần tham gia vào quá trình tổng hợp (Barrett et al., 2011). Các giá trị PEI bao gồm: tốc độ phát thải PEI ra khỏi hệ thống do các quá trình hóa học tạo thành,  $i_{ra}^{(cp)}$ ; tốc độ phát thải PEI ra khỏi hệ thống do các quá trình sản sinh năng lượng có ích,  $i_{ra}^{(ep)}$ ; tốc độ phát thải PEI ra khỏi hệ thống do sự giải phóng năng lượng dư thừa trong quá trình sản sinh năng lượng,  $i_{we}^{(cp)}$ ; PEI phát thải ra khỏi hệ thống do sự giải phóng năng lượng dư thừa từ các quá trình hóa học,  $i_{we}^{(ep)}$ . Các giá trị này được tính dựa vào cân bằng khối lượng và năng lượng, cùng với



Hình 2. Sơ đồ dòng vật chất trong quá trình tổng hợp vật liệu  $C_3N_4$  mang CQDs

thông tin về tác động môi trường của các hợp chất hóa học và năng lượng theo công thức sau:

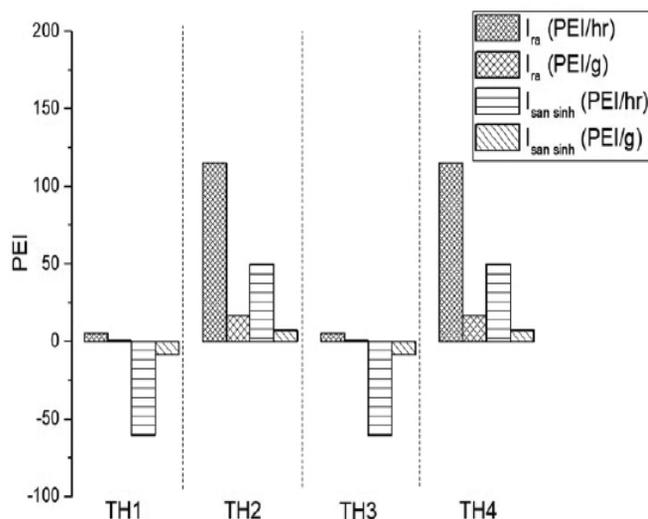
$$i_{ra}^{(t)} = i_{ra}^{(cp)} + i_{ra}^{(ep)} + i_{we}^{(cp)} + i_{we}^{(ep)} \quad (1)$$

$$i_{ra}^{(t)} = \frac{i_{ra}^{(cp)} + i_{ra}^{(ep)} + i_{we}^{(cp)} + i_{we}^{(ep)}}{\sum P P P} \quad (2)$$

$$i_{san\ sinh}^{(t)} = i_{ra}^{(cp)} - i_{vào}^{(cp)} + i_{ra}^{(ep)} - i_{vào}^{(ep)} + i_{we}^{(cp)} + i_{we}^{(ep)} \quad (3)$$

$$i_{san\ sinh}^{(t)} = \frac{i_{ra}^{(cp)} - i_{vào}^{(cp)} + i_{ra}^{(ep)} - i_{vào}^{(ep)} + i_{we}^{(cp)} + i_{we}^{(ep)}}{\sum P P P} \quad (4)$$

Quá trình tính toán các chỉ số tác động môi trường được xem xét với 4 trường hợp: không bao gồm dòng sản phẩm và dòng năng lượng trong quá trình tính toán (TH1); chỉ bao gồm dòng sản phẩm trong quá trình tính toán (TH2); chỉ bao gồm dòng năng lượng trong quá trình tính toán (TH3); bao gồm cả dòng sản phẩm và dòng năng lượng trong tính toán (TH4). Trong nghiên cứu này, than đá là vật liệu được sử dụng làm nguồn năng lượng cung cấp cho quá trình tổng hợp.



Hình 3. Tác động tiềm ẩn của quá trình tổng hợp  $C_3N_4$  mang CQDs đến môi trường

### 2.2.2. Phương pháp phân tích dòng vật chất

Nghiên cứu sử dụng phương pháp phân tích dòng vật chất (SFA) để tối ưu các dòng vật chất trong quá trình tổng hợp vật liệu  $C_3N_4$  mang CQDs. Phương pháp này dựa trên quy tắc cân bằng khối lượng của các dòng vật chất ra và vào hệ thống bao gồm các quá trình được giới hạn trong đường biên (Hình 2). Để tối ưu các dòng vật chất này, nghiên cứu sử dụng phần mềm STAN 2.7 cho các phép tính tối ưu hóa các giá trị lưu lượng của các dòng luân chuyển trong hệ thống khảo sát. Các giá trị số trong Hình 2 thể hiện các giá trị lưu lượng (g/h) của các dòng vật chất luân chuyển trong hệ thống.

## 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

### 3.1. Phân tích tác động môi trường tiềm ẩn tổng cộng của quá trình tổng hợp vật liệu $C_3N_4$ mang CQDs

Hình 3 cho thấy, ảnh hưởng của quá trình tổng hợp  $C_3N_4$  mang CQDs đến môi trường được thể hiện qua các giá trị PEI tương ứng với 4 trường hợp được khảo sát. Giá trị PEI của dòng đầu ra mỗi giờ của TH2 và TH4 cao hơn TH1 và TH3; giá trị PEI đầu ra mỗi giờ của TH3 không thay đổi so với TH1 chứng tỏ các hóa chất sử dụng và sản phẩm tạo thành là các tác nhân gây ảnh hưởng đến môi trường, sản phẩm tạo thành làm tăng khả năng tác động đến môi trường của cả quá trình tổng hợp vật liệu. Giá trị PEI của dòng sản sinh mỗi giờ bởi hệ thống trong các TH2 và TH4 mang giá trị dương và cao hơn TH1 và TH3 mang giá trị âm. Các giá trị âm của TH1 và TH3 cho thấy chitosan góp phần làm giảm ảnh hưởng đến môi trường (Meramo-Hurtado et al., 2020; Moreno-Sader et al., 2020). Giá trị PEI giảm đi khi chuẩn hóa dòng đầu ra và dòng sản sinh bởi 1 đơn vị khối lượng sản phẩm tạo thành, giá trị phát thải PEI từ hệ thống cho thấy các ảnh hưởng đến môi trường của quá trình tổng hợp  $C_3N_4$  mang CQDs chủ yếu là do sản phẩm tạo thành.



### 3.2. Phân tích độc tính tiềm ẩn của quá trình tổng hợp vật liệu C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> mang CQDs

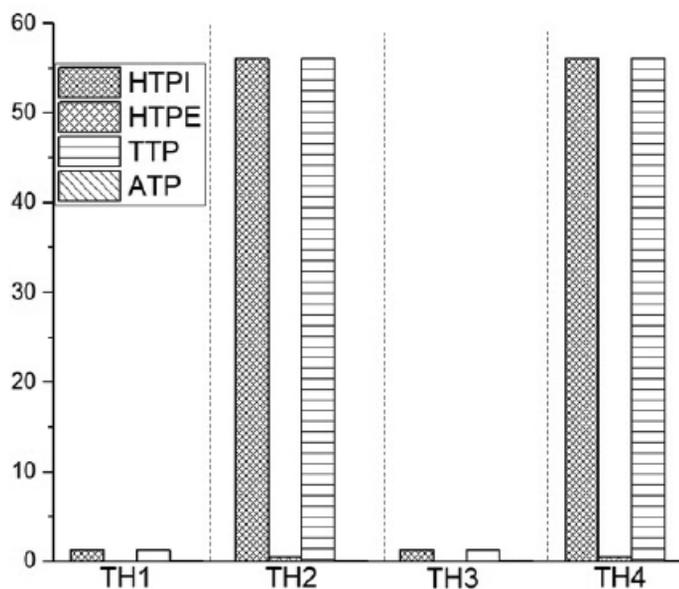
Để phân tích độc tính tiềm ẩn của quá trình tổng hợp vật liệu C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> mang CQDs, nghiên cứu tiến hành tính toán các chỉ số HTPI, HTPE, TTP và ATP của quá trình tổng hợp vật liệu C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> mang CQDs. Hình 4 thể hiện khả năng gây độc của quá trình tổng hợp vật liệu C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> mang CQDs đối với con người và môi trường đất cao hơn so với môi trường nước. Giá trị PEI của chỉ số HTPI trong các TH1, TH2, TH3 và TH4 chiếm tỉ trọng lần lượt là 25,9 %, 48,8 %, 24,8 % và 48,8 % trong tổng số PEI của dòng đầu ra mỗi giờ của hệ thống. Giá trị PEI của chỉ số TTP trong các TH1, TH2, TH3 và TH4 chiếm cùng tỉ trọng như chỉ số HTPI. Điều này cho thấy vật liệu C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> mang CQDs là tác nhân làm gia tăng độc tính tiềm ẩn của quá trình tổng hợp vật liệu đến con người và môi trường.

### 3.3. Phân tích tác động tiềm ẩn của quá trình tổng hợp C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> mang CQDs đến bầu khí quyển

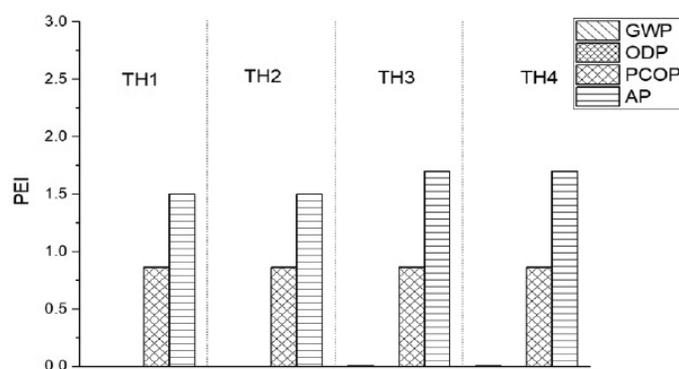
Tác động tiềm ẩn của quá trình tổng hợp C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> mang CQDs đến bầu khí quyển được đánh giá thông qua các chỉ số môi trường bao gồm GWP, ODP, PCOP và AP (Hình 5). Giá trị của các chỉ số GWP và ODP trong các TH1 và TH2 bằng 0 chứng tỏ vật liệu C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> mang CQDs và các hóa chất được sử dụng trong quá trình tổng hợp C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> mang CQDs không có khả năng gây ra hiện tượng ấm lên toàn cầu và sự suy giảm tầng ô-dôn. Tuy nhiên, nguồn năng lượng được sử dụng trong quá trình tổng hợp lại có khả năng gây ra hiện tượng ấm lên toàn cầu. Mặt khác, giá trị PEI của chỉ số GWP của quá trình tổng hợp là 9.1×10<sup>-4</sup> PEI/kg sản phẩm tạo thành, cao hơn so với tiêu chuẩn GreenHouse Gas Protocol, 2015 (Institute, 2015), chứng tỏ khả năng gây ra hiện tượng ấm lên toàn cầu của quá trình tổng hợp C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> mang CQDs. Bên cạnh khả năng gây ra hiện tượng ấm lên toàn cầu của quá trình tổng hợp, quá trình tổng hợp còn có khả năng gây ra hiện tượng axit hóa và oxy hóa quang hóa.

### 3.4. Phân tích tác động môi trường tiềm ẩn của các dạng nguồn năng lượng khác nhau cung cấp cho quá trình tổng hợp C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> mang CQDs

Để nghiên cứu khả năng tác động của các dạng nguồn năng lượng khác nhau cung cấp cho quá trình tổng hợp C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> mang CQDs đến môi trường, nghiên cứu tiến hành tính toán các chỉ số môi trường khi sử dụng các dạng nguồn năng lượng khác nhau. Kết quả tính toán các chỉ số trong

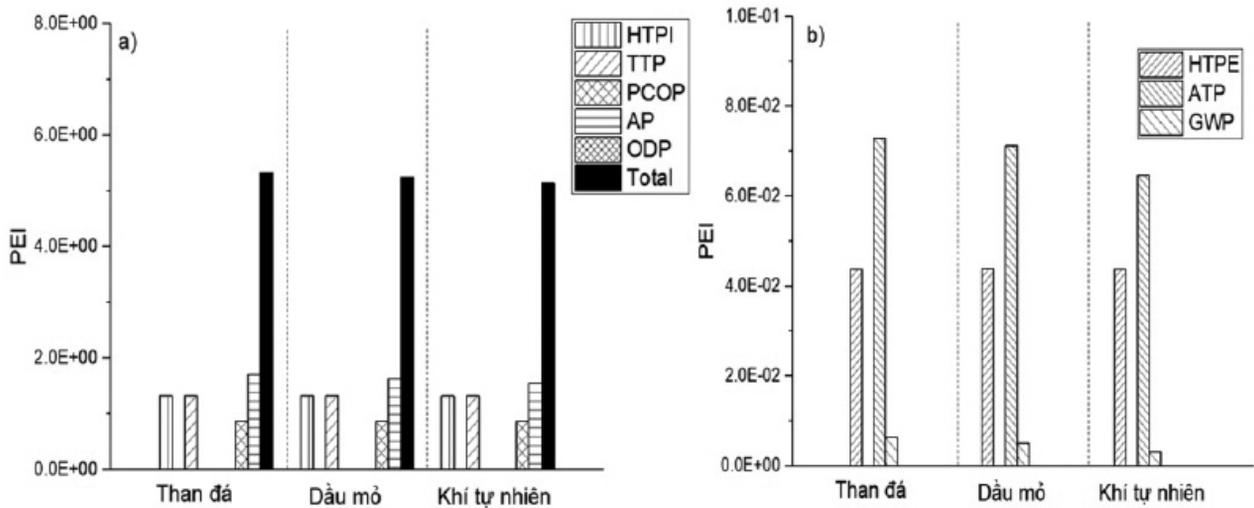


Hình 4. Các chỉ số thể hiện độc tính tiềm ẩn của quá trình tổng hợp C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> mang CQDs đến môi trường.

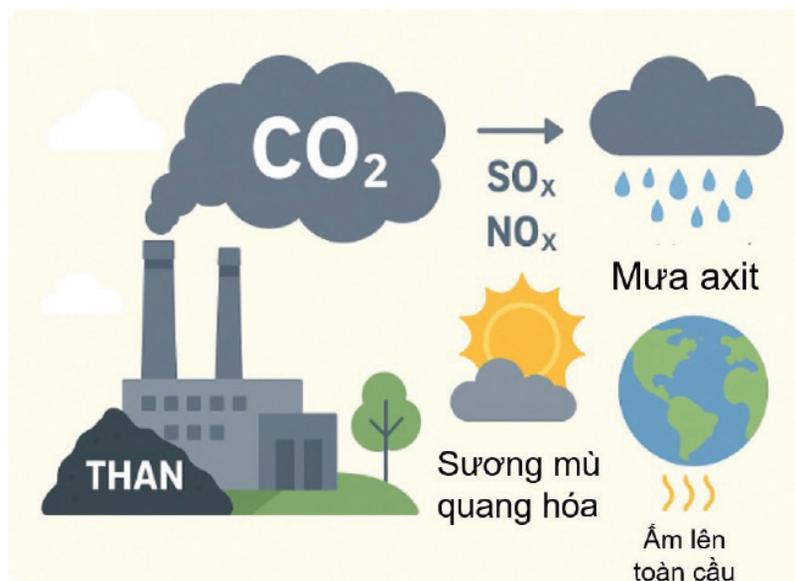


Hình 5. Các chỉ số thể hiện tác động tiềm ẩn của quá trình tổng hợp C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> mang CQDs đến bầu khí quyển

Hình 6 cho thấy, giá trị PEI tổng cộng của dòng đầu ra mỗi giờ giảm dần khi nguồn năng lượng được sử dụng chuyển từ than đá sang dầu mỏ và khí tự nhiên. Đối với nhóm chỉ số HTPI, HTPE, ATP và TTP, nghiên cứu cho thấy mức độ rủi ro gây độc đối với con người và môi trường đất của quá trình tổng hợp là như nhau đối với cả 3 dạng nguồn năng lượng được khảo sát và có xu hướng giảm dần đối với môi trường đất. Đối với nhóm chỉ số dùng để đánh giá tác động tiềm ẩn của quá trình tổng hợp C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> mang CQDs đến bầu khí quyển, nghiên cứu cho thấy đối với quá trình tổng hợp C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> mang CQDs có khả năng gây ra hiện tượng axit hóa, oxy quang hóa và ấm lên toàn cầu, trong đó khả năng gây ra hiện tượng ấm lên toàn cầu giảm dần khi nguồn năng lượng sử dụng chuyển từ than đá sang dầu mỏ và khí tự nhiên. Quá trình đốt than tạo ra nhiều khí nhà kính và các hợp chất SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> là các tác nhân gây ra hiện tượng mưa axit, sương mù quang hóa và ấm



Hình 6. Các chỉ số (a,b) thể hiện tác động môi trường tiềm ẩn của 3 dạng nguồn năng lượng



Hình 7. Mô tả các hiện tượng gây ra bởi quá trình phát thải CO<sub>2</sub>

lên toàn cầu (Kaygusuz, 2009; Muilwijk et al., 2016; Querol et al., 2008).

#### 4. KẾT LUẬN

Trên cơ sở tính toán các chỉ số môi trường của quá trình tổng hợp C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> mang CQDs, nghiên cứu cho thấy việc sử dụng chitosan làm nguồn nguyên liệu đầu vào của quá trình tổng hợp vật liệu góp phần làm giảm ảnh hưởng đến môi trường. Trong dòng đầu ra, vật liệu C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> mang CQDs là tác nhân làm gia tăng độc tính tiềm ẩn của quá trình tổng hợp vật liệu đến con người và môi trường. Bên cạnh đó, vật liệu C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> mang CQDs và các hóa chất được sử dụng trong quá trình tổng hợp không có khả năng gây ra hiện tượng ấm lên toàn cầu. Tuy nhiên, nguồn năng lượng được sử dụng trong quá trình tổng hợp lại có khả năng gây ra hiện tượng ấm

lên toàn cầu, hiện tượng axit hóa và oxy hóa quang hóa. Nghiên cứu cũng cho thấy quá trình chuyển từ than đá sang dầu mỏ và khí tự nhiên trong quá trình tổng hợp vật liệu C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> mang CQDs góp phần làm giảm khả năng gây ra hiện tượng ấm lên toàn cầu của quá trình tổng hợp. Tuy nhiên, nghiên cứu hiện thực hiện ở quy mô pilot nên chưa tính đến các dòng vật chất và năng lượng tham gia vào quá trình tổng hợp ở các quy mô lớn hơn như quy mô công nghiệp. Do đó, cần có các nghiên cứu để tính toán các chỉ số môi trường này ở các quy mô lớn hơn.

**Lời cảm ơn:** Nghiên cứu được tài trợ bởi Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh (ĐHQG-HCM) trong khuôn khổ Đề tài mã số DN2022-24-01. Tập thể tác giả chân thành gửi lời cảm ơn đến ĐHQG-HCM đã



tài trợ thực hiện nghiên cứu này, Viện Môi trường và Tài nguyên đã hỗ trợ, tạo mọi điều kiện thuận lợi để chúng tôi có thể hoàn thành nghiên cứu ■

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. 2017. National Toxicology Program. NTP Technical Report on the Toxicity Study of Chitosan (CASRN 9012-76-4) Administered in Feed to Sprague Dawley [Cr:CD(SD)] Rats: Toxicity Report 93 [Internet].
2. Ahmed, H.B., Mikhail, M.M., El-Shahat, M. and Emam, H.E. 2025. Clustering of carbon quantum dots from polysaccharides (Cellulose, Alginate, Chitosan) versus heterocyclic compounds: Synthesis, characterization and medical applications. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications* 9, 100738.
3. Barrett, W.M., van Baten, J. and Martin, T. 2011. Implementation of the waste reduction (WAR) algorithm utilizing flowsheet monitoring. *Computers & Chemical Engineering* 35(12), 2680-2686.
4. Cazón, P. and Vázquez, M. (2019) Sustainable Agriculture Reviews 36: Chitin and Chitosan: Applications in Food, Agriculture, Pharmacy, Medicine and Wastewater Treatment. Crini, G. and Lichtfouse, E. (eds), pp. 81-123, Springer International Publishing, Cham.
5. Chaluvachar, P., Sudhakar, Y.N., Mahesha, G.T., Nair, V.G., Desai, N. and Pai, D.K. 2025. Emerging role of graphitic carbon nitride in advanced supercapacitors: A comprehensive review. *Journal of Energy Chemistry* 103, 498-524.
6. Flórez, M., Guerra-Rodríguez, E., Cazón, P. and Vázquez, M. 2022. Chitosan for food packaging: Recent advances in active and intelligent films. *Food Hydrocolloids* 124, 107328.
7. Institute, W.R. 2015. Global Warming Potential Values. *Greenhouse Gas Protocol*.
8. Islam, M.M., Shahrizzaman, M., Biswas, S., Nurus Sakib, M. and Rashid, T.U. 2020. Chitosan based bioactive materials in tissue engineering applications-A review. *Bioactive Materials* 5(1), 164-183.
9. Jourshabani, M., Long, N.V.D., Asrami, M.R., Pho, Q.H., Lee, B.-K. and Hessel, V. 2024. Nitrogen-doped carbon quantum dot as electron acceptor anchored on graphitic carbon nitride nanosheet for improving rhodamine B degradation. *Materials Science and Engineering: B* 305, 117417.
10. K, H. 2024. A review on carbon quantum dot/semiconductor-based nanocomposites as hydrogen production photocatalysts. *RSC Advances* 14(32), 23404-23422.
11. Kaygusuz, K. 2009. Energy and environmental issues relating to greenhouse gas emissions for sustainable development in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13(1), 253-270.
12. Li, H., Wang, Y., Kang, Y., He, Y., Nie, J., Ma, C., Yang, X., Chen, Z. and Lu, C. 2025. Novel injectable self-healing bifunctionalized chitosan hydrogel with cell proliferation and antibacterial activity for promoting wound healing. *International Journal of Biological Macromolecules* 306, 141259.
13. Meramo-Hurtado, S., Alarcón-Suesca, C. and González-Delgado, Á.D. 2020. Exergetic sensibility analysis and environmental evaluation of chitosan production from shrimp exoskeleton in Colombia. *Journal of Cleaner Production* 248, 119285.
14. Moreno-Sader, K., Meramo-Hurtado, S.I. and González-Delgado, A.D. 2020. Environmental sustainability analysis of chitosan microbeads production for pharmaceutical applications via computer-aided simulation, WAR and TRACI assessments. *Sustainable Chemistry and Pharmacy* 15, 100212.
15. Muilwijk, C., Schrijvers, P.J.C., Wuerz, S. and Kenjereš, S. 2016. Simulations of photochemical smog formation in complex urban areas. *Atmospheric Environment* 147, 470-484.
16. Querol, X., Izquierdo, M., Monfort, E., Alvarez, E., Font, O., Moreno, T., Alastuey, A., Zhuang, X., Lu, W. and Wang, Y. 2008. Environmental characterization of burnt coal gangue banks at Yangquan, Shanxi Province, China. *International Journal of Coal Geology* 75(2), 93-104.
17. Sharif, R., Mujtaba, M., Ur Rahman, M., Shalmani, A., Ahmad, H., Anwar, T., Tianchan, D. and Wang, X. 2018. The Multifunctional Role of Chitosan in Horticultural Crops; A Review.
18. Song, J., Zhao, L., Wang, Y., Xue, Y., Deng, Y., Zhao, X. and Li, Q. 2018. Carbon Quantum Dots Prepared with Chitosan for Synthesis of CQDs/AuNPs for Iodine Ions Detection. *Nanomaterials (Basel)* 8(12).
19. Zhang, L., Zhang, J., Xia, Y., Xun, M., Chen, H., Liu, X. and Yin, X. 2020. Metal-Free Carbon Quantum Dots Implant Graphitic Carbon Nitride: Enhanced Photocatalytic Dye Wastewater Purification with Simultaneous Hydrogen Production.
20. Zhang, X., Li, R., Li, S., Cui, W., Wang, D., Zhu, Y., Liu, Z., Hou, Y. and Lee, S. 2025. Tri-network PVA/chitosan/gelatin hydrogel modified by tannic acid with self-healing, adhesive and anti-inflammatory properties to accelerate wound healing. *International Journal of Biological Macromolecules* 308, 142280.