

DOI:10.22144/ctujos.2026.003

THAN SINH HỌC TỪ PHỤ PHẨM NÔNG NGHIỆP: TÍNH CHẤT VÀ TIỀM NĂNG ỨNG DỤNG TRONG XỬ LÝ KHÁNG SINH

Lâm Phúc Thông*, Nguyễn Minh Nhựt và Đặng Huỳnh Giao

Khoa Kỹ thuật hóa học, Đại học Cần Thơ, Việt Nam

*Tác giả liên hệ (Corresponding author): lpthong@ctu.edu.vn

Thông tin chung (Article Information)

Nhận bài (Received): 16/05/2025

Sửa bài (Revised): 08/06/2025

Duyệt đăng (Accepted): 30/11/2025

Title: Agricultural Waste-derived Biochar: Characteristics and Potential Applications in Antibiotic Remediation

Author: Lam Phuc Thong*, Nguyen Minh Nhut and Dang Huynh Giao

Affiliation(s): College of Engineering, Can Tho University, Viet Nam

TÓM TẮT

Ô nhiễm kháng sinh trong môi trường nước đang trở nên ngày càng nghiêm trọng cho môi trường và sức khỏe con người cũng như động vật. Các phương pháp xử lý kháng sinh hiện nay đang là thách thức quan trọng và chưa thể hiện được hiệu quả cao. Hấp phụ cho thấy được tiềm năng trong việc xử lý hiệu quả kháng sinh, nhất là ở nồng độ thấp. Trong các loại vật liệu hấp phụ, than sinh học (TSH) từ phụ phẩm nông nghiệp ngày càng được quan tâm trong việc xử lý các ô nhiễm môi trường do có đặc tính tốt, chi phí sản xuất thấp và thân thiện với môi trường. TSH cho thấy được hiệu quả xử lý kháng sinh cao so với các loại vật liệu khác với dung lượng hấp phụ tối đa có thể đạt hơn 550 mg/g, trong khi chi phí sản xuất chỉ trong khoảng từ 0,35 đến 1,2 USD/kg, thấp hơn đáng kể so với các loại vật liệu khác. Kết quả cho thấy TSH đang được xem là một trong những giải pháp tiềm năng để giải quyết hiệu quả ô nhiễm kháng sinh ở Việt Nam.

Từ khóa: Hấp phụ, kháng sinh, phụ phẩm nông nghiệp, than sinh học, xử lý chất ô nhiễm

ABSTRACT

Antibiotic contamination poses a significant threat to both the ecological environment and human health. The conventional methods for removing antibiotics from water sources have become a significant challenge. The adsorption process has been considered as a potential approach due to its high effectiveness in removing antibiotics, particularly at low concentrations. Among various adsorbents, biochar derived from agricultural waste has garnered particular attention in contaminant treatment due to its favorable characteristics, low-cost production, and eco-friendly nature. Studies reported that biochar-based adsorbents performed well in removing antibiotics compared to other adsorbents, potentially achieving a maximum adsorption capacity exceeding 550 mg/g, while their production costs ranged between 0.35 and 1.2 USD/kg, which is significantly cheaper than that of the others. Therefore, biochar has been considered an emerging approach for antibiotic treatment in Vietnam.

Keywords: Adsorption, agricultural waste, antibiotics, biochar, contaminant treatment

1. GIỚI THIỆU

Các chất ô nhiễm hữu cơ hiện nay nổi lên là một mối quan tâm rất lớn cho các vấn đề về môi trường, sức khỏe con người và động thực vật. Các chất này bao gồm kháng sinh và các loại thuốc khác (bao gồm thuốc giảm đau, hormone và các sản phẩm chăm sóc cá nhân) có tác động ngày càng to lớn khi cuộc sống ngày càng phát triển (Ouda et al., 2021). Kháng sinh là một trong những phương pháp hiệu quả nhất để điều trị các bệnh nhiễm trùng ở người và động vật. Hơn nữa, kháng sinh có thể được dùng như là thuốc ngăn ngừa và được sử dụng phổ biến ở các nông trại và nuôi trồng thủy sản (McEwen & Fedorka-Cray, 2002; Van Boeckel et al., 2015). Trong lúc kinh tế phát triển nhanh chóng, kháng sinh được sử dụng rộng rãi để đáp ứng nhu cầu to lớn của việc điều trị và cung cấp thực phẩm cho con người. Tuy nhiên, việc sản xuất và sử dụng lượng rất lớn kháng sinh cũng dẫn đến nguy cơ ô nhiễm môi trường (Kümmerer, 2009). Kháng sinh được tìm thấy trong môi trường đất và nước như ao hồ, sông, nước ngầm, nước thải và thậm chí là nước uống (Kolpin et al., 2004; Valcárcel et al., 2013; Sui et al., 2015).

Kháng sinh trong môi trường nước từ các nguồn khác nhau như từ nguồn thải từ bệnh viện, rác thải sinh hoạt hoạt động sản xuất nông nghiệp, thủy sản (Hirsch et al., 1999; Lin et al., 2008) và công nghiệp dược phẩm (Phillips et al., 2010). Đối với Việt Nam có nền kinh tế phát triển nhanh, việc sản xuất và sử dụng kháng sinh cho con người và vật nuôi là rất lớn (Sy et al., 2017). Do đó, lượng lớn kháng sinh tồn dư bị xả thải ra môi trường. Tuy nhiên, các thông tin về ô nhiễm kháng sinh tại Việt Nam là rất hạn chế so với các nước khác. Ở Việt Nam, có một số nghiên cứu về ô nhiễm kháng sinh trong môi trường nước, nhưng các nghiên cứu này khi được thực hiện phần lớn chỉ tập trung vào các nguồn thải từ quá trình hoạt động sản xuất thủy sản. Có khoảng 138 loại kháng sinh trong số 376 sản phẩm được sử dụng trong thủy sản tại Việt Nam (Tai, 2003). Điều đó dẫn đến lượng kháng sinh tồn dư trong nước thải sản xuất thủy sản được phát hiện là rất lớn. Kết quả một nghiên cứu cho thấy, 91,6% mẫu nước mặt được phân tích tại đồng bằng sông Cửu Long nhận nước thải từ thủy sản chứa 1 loại kháng sinh, và 55,2% mẫu có từ 3 đến 4 loại kháng sinh. Những loại kháng sinh trong nước thải nuôi trồng thủy sản được tìm thấy gồm sulfonamides, macrolides, cyclines and quinolones (Tai, 2003). Sự tồn tại kháng sinh trong nước thải thủy sản làm tăng nguy cơ ảnh hưởng đến môi trường sinh thái và sức khỏe con người.

Các phương pháp truyền thống được áp dụng để xử lý kháng sinh bằng các phương pháp sinh học và cơ học (Sen et al., 2023), tuy nhiên các phương pháp này chưa thể hiện sự hiệu quả cần thiết. Các cách tiếp cận mới được phát triển để tăng hiệu quả xử lý như phương pháp oxy hoá nâng cao (AOPs), lọc nano, lọc màng thẩm thấu ngược, các phản ứng sinh học (Homem & Santos, 2011; Hiller et al., 2019; Diao et al., 2021; Nasrollahi et al., 2022). Các phương pháp này cho thấy hiệu quả khi xử lý kháng sinh từ nước thải ở quy mô nhỏ, nhưng có nhược điểm là chi phí xây dựng và vận hành cao hoặc diễn ra chậm, do đó hiệu quả xử lý ở quy mô lớn là chưa được chứng minh rõ (Leng et al., 2020; Sen et al., 2023). Kết quả các nghiên cứu hiện nay cho thấy phương pháp hấp phụ có tính hiệu quả xử lý các chất ô nhiễm trong nước như kim loại nặng, ô nhiễm hữu cơ, phẩm màu. Bên cạnh đó, phương pháp này có tính kinh tế cao, đặc biệt là sử dụng vật liệu hấp phụ từ các phụ phẩm nông nghiệp, do đó thường được sử dụng rộng rãi (Kermani et al., 2017; Kakavandi et al., 2018). Các loại vật liệu hấp phụ khác nhau được xử lý bằng phương pháp nhiệt hoặc hoá học để có được tính chất hấp phụ phù hợp. Than hoạt tính là vật liệu rất tiềm năng để xử lý các chất ô nhiễm hữu cơ trong nước, tuy nhiên chi phí chế tạo than hoạt tính lại cao, làm giảm hiệu quả kinh tế. Một số vật liệu hấp phụ khác đang được nghiên cứu để xử lý ô nhiễm kháng sinh như vật liệu nano graphene, carbon nanotubes và than sinh học (TSH) (Ahmed et al., 2015; Biswal & Balasubramanian, 2022). Trong các loại vật liệu trên, TSH được sản xuất từ phụ phẩm nông nghiệp và lâm nghiệp đang cho thấy tiềm năng rất lớn vì hiệu quả cao và chi phí thấp. TSH cho thấy tính chất hấp phụ tốt với diện tích bề mặt riêng lớn, thể tích lỗ xốp cao, nhiều nhóm chức trên bề mặt và các tính chất này có thể được thay đổi bằng các phương pháp hoạt hoá để phù hợp xử lý cho từng loại chất ô nhiễm riêng (He et al., 2022).

Tiềm năng sinh khối từ phụ phẩm nông nghiệp ở Việt Nam là rất lớn. Việt Nam là một nước sản xuất nông nghiệp, theo tính toán lý thuyết, tổng lượng sinh khối được ghi nhận là gần 100 triệu tấn/năm. Đồng bằng sông Cửu Long là vùng có tiềm năng sinh khối rất lớn, đặc biệt là sinh khối từ phụ phẩm nông nghiệp như rơm rạ, vỏ trấu, bã mía,... với khoảng 30 triệu tấn/năm (Nguyen et al., 2022). Về cơ bản, thành phần chính của sinh khối gồm hemicellulose (30 – 45%), cellulose (15 – 40%) và lignin (5 – 25%) với hàm lượng carbon và oxy cao (35 – 46%), do đó rất thích hợp để tạo ra vật liệu hấp phụ có tính chất tốt như diện tích bề mặt lớn, thể tích lỗ xốp cao và nhiều nhóm chức trên bề mặt vật liệu,

phù hợp xử lý các chất ô nhiễm hữu cơ, trong đó có kháng sinh. Các phương pháp tạo ra TSH từ sinh khối hiện nay có thể từ các phương pháp nhiệt phân, đốt cháy và khí hóa. Các phương pháp này ảnh hưởng rất lớn đến tính chất TSH bên cạnh điều kiện thực hiện như tốc độ gia nhiệt, nhiệt độ nung và thành phần sinh khối (Xie et al., 2022). Kết quả các nghiên cứu cho thấy, quá trình nhiệt phân chậm ở nhiệt độ cao có thể thu được lượng than lớn hơn và tính chất bề mặt tốt hơn (Yaashikaa et al., 2020). Bên cạnh đó, để gia tăng đặc tính vật liệu TSH, các quá trình hoạt hóa vật lý và hóa học có thể được sử dụng để làm tăng hiệu quả xử lý (Tran et al., 2017; Sajjadi et al., 2019). Các kết quả phân tích cho thấy các tác động hóa học làm thay đổi rất lớn đến cấu trúc và tính chất vật liệu, từ đó có thể làm tăng hiệu quả rõ rệt khả năng hấp phụ các chất kháng sinh ô nhiễm trong nước (Sajjadi et al., 2018; Biswal & Balasubramanian, 2022; Wakejo et al., 2022).

Nghiên cứu này được thực hiện để đánh giá tiềm năng xử lý hiệu quả một số loại kháng sinh khác trong nước thải bằng vật liệu TSH từ phụ phẩm nông nghiệp bằng các phương pháp hoạt hóa khác nhau. Các tính chất của TSH và sự tương tác giữa kháng sinh và TSH sẽ giúp làm rõ cơ chế xử lý, hiệu quả loại bỏ kháng sinh trong nước thải, từ đó có thể tối ưu hóa hiệu quả xử lý và ứng dụng trong quy mô lớn.

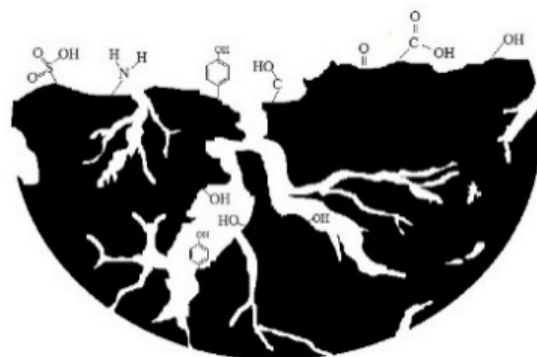
2. THAN SINH HỌC TỪ PHỤ PHẨM NÔNG NGHIỆP

TSH là vật liệu giàu carbon được sản xuất phần lớn bằng phương pháp nhiệt phân sinh khối. Tính chất của TSH phụ thuộc vào loại sinh khối, và điều kiện sản xuất. Nhìn chung, tính chất TSH gồm hàm lượng carbon lớn (50 – 90%), diện tích bề mặt lớn, cấu trúc xốp và nhiều nhóm chức trên bề mặt vật liệu như được mô tả trong Hình 1. Những đặc chất này giúp tăng cường sự tương tác giữa vật liệu và các chất ô nhiễm, từ đó có thể nâng cao hiệu quả xử lý chất ô nhiễm trong nước (Ambaye et al., 2021; Xiang et al., 2019; Yaashikaa et al., 2020).

TSH được sản xuất chính bằng quá trình nhiệt phân ở nhiệt độ cao (từ 250 đến 900°C) trong môi trường hạn chế tác nhân oxy hóa. Quá trình nhiệt phân có thể được phân loại thành 3 nhóm như sau (Yaashikaa et al., 2020).

- Nhiệt phân chậm: Tốc độ nhiệt phân từ 1 đến 10°C, sản phẩm chính của quá trình này là TSH.
- Nhiệt phân nhanh: Quá trình được thực hiện ở tốc độ nung từ 10 đến 100°C, sản phẩm chính là dầu sinh học.

- Nhiệt phân rất nhanh với tốc độ nung hơn 1000°C , quá trình tạo ra phần lớn là hỗn hợp khí.



Hình 1. Cấu trúc than sinh học

Bên cạnh đó, nhiệt độ và loại thiết bị nhiệt phân cũng ảnh hưởng lớn đến đặc tính TSH, dựa trên khả năng phân huỷ các hợp chất hữu cơ trong sinh khối và phân bố nhiệt độ trong thiết bị phản ứng. Nhiệt độ nhiệt phân cao giúp thúc đẩy quá trình carbon hoá, tăng độ xốp, diện tích bề mặt của vật liệu, tuy nhiên cũng giảm các nhóm chức có oxy trên bề mặt của TSH do sự suy giảm hàm lượng oxy, hydro và nito của vật liệu. Thiết bị phản ứng cũng ảnh hưởng quan trọng đến quá trình nhiệt phân. Một số loại thiết bị nhiệt phân dạng tầng sôi có thể giúp nâng cao hiệu quả quá trình do phân bố nhiệt độ đồng đều, nhiệt độ quá trình cao hơn so với một số loại thiết bị khác như thiết bị tầng cố định, thùng quay.

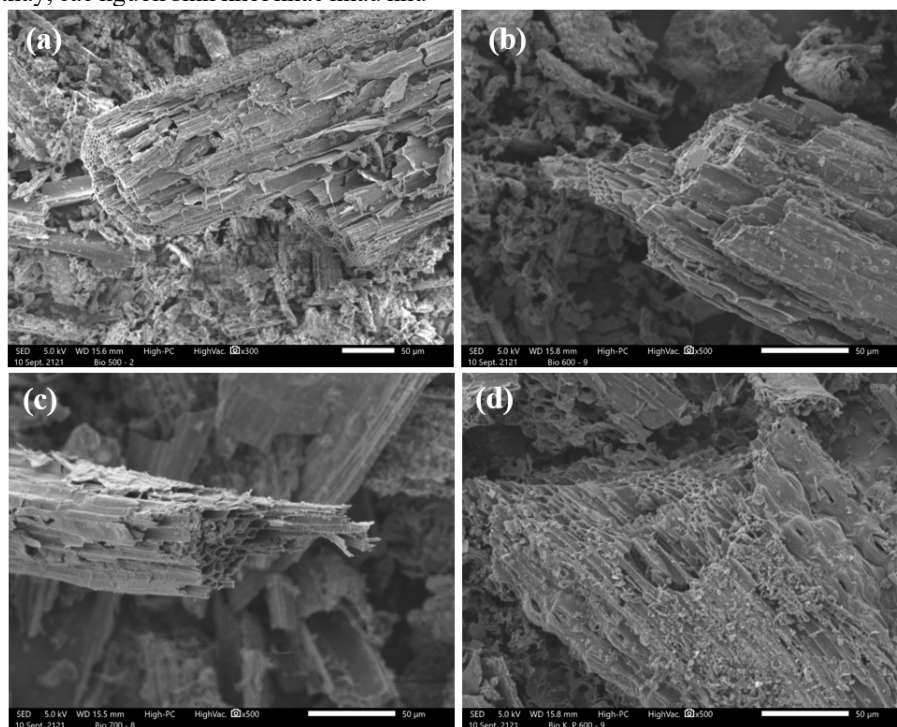
2.1. Diện tích bề mặt và cấu trúc lỗ xốp vật liệu

Cấu trúc TSH thay đổi dưới sự tác động của các điều kiện nhiệt phân và các phương pháp biến tính (BT). TSH với diện tích bề mặt lớn và độ xốp cao có thể làm tăng khả năng hấp phụ của vật liệu. Những đặc tính này phụ thuộc rất nhiều vào nhiệt độ nhiệt phân, tốc độ gia nhiệt cũng như nguồn sinh khối nguyên liệu. Cấu trúc xốp của vật liệu hình thành trong quá trình nhiệt phân khi phân hủy các thành phần của sinh khối như hemicellulose, cellulose và lignin thành các chất dễ bay hơi thoát ra khỏi vật liệu. Cấu trúc xốp của vật liệu có thể phân loại thành cấu trúc nhỏ (đường kính lỗ nhỏ hơn 2 nm), trung (từ 2 đến 50 nm) và lớn (lớn hơn 50 nm). Hình 2 thể hiện hình thái vật liệu TSH từ rơm rạ được xử lý ở các điều kiện khác nhau. Vật liệu TSH có cấu trúc tổ ong đa cạnh, rất nhiều lỗ xốp, bề mặt gồ ghề. Kết quả cho thấy khi tăng nhiệt độ nung từ 500 đến 700°C (Hình 2a – Hình 2c), cấu trúc xốp vật liệu rõ ràng hơn và thành vật liệu mỏng hơn. Điều này là do khi nhiệt độ nhiệt phân tăng lên, các thành phần hữu cơ phân hủy thành các hợp chất dễ

bay hơi nhiều hơn và quá trình carbon hóa tăng lên đáng kể. Kết quả này phù hợp với các nghiên cứu đã được công bố (Sajjadi et al., 2019). Bên cạnh đó, khi biến tính bằng phương pháp hóa học, các tác nhân hóa học như KOH và H_3PO_4 tương tác và phá vỡ cấu trúc Carbon trong TSH, cấu trúc xốp được mở rộng và bề mặt vật liệu bị phá vỡ đáng kể (Hình 2d). Những thay đổi trong hình thái cấu trúc vật liệu làm thay đổi đặc tính của vật liệu (Sajjadi et al., 2018).

Một trong những yếu tố quan trọng ảnh hưởng lớn đến đặc tính TSH là thành phần nguyên liệu sinh khối ban đầu. Thành phần nguyên liệu sinh khối có thể được đánh giá qua bốn yếu tố như độ ẩm, tỷ lệ hợp chất dễ bay hơi (VM), carbon cố định (FC) và tro (Vassilev et al., 2010). Các thành phần này phụ thuộc rất nhiều vào loại sinh khối như trong Bảng 1. Những sinh khối có hàm lượng chất dễ bay hơi cao khi nhiệt phân tạo ra vật liệu TSH có độ xốp cao và diện tích bề mặt riêng lớn, trong khi TSH thu được lượng lớn với tỷ lệ FC cao trong nguyên liệu. Từ Bảng 2 cho thấy, các nguồn sinh khối khác nhau như

bã mía, xơ dừa và rơm rạ sẽ tạo ra các loại vật liệu TSH có tính chất khác nhau. Kết quả cho thấy TSH từ bã mía và xơ dừa có diện tích bề mặt riêng cao hơn đáng kể so với các loại nguyên liệu khác khi xử lý cùng điều kiện. Điều này là do tỷ lệ VM trong bã mía và xơ dừa cao hơn so với rơm rạ và trấu. Sự khác nhau về thành phần sẽ ảnh hưởng đến hàm lượng carbon cố định và các hợp chất dễ bay hơi trong quá trình nhiệt phân. Bên cạnh đó, khi tăng nhiệt độ nhiệt phân sẽ làm tăng rõ rệt tính chất của TSH. TSH có diện tích bề mặt riêng và thể tích lỗ xốp tăng rất lớn đến gần 6 lần và 4 lần (TSH rơm rạ) khi nhiệt độ xử lý tăng. Kết quả này là do khi nhiệt độ nhiệt phân tăng, các thành phần trong sinh khối phân hủy nhiều hơn để tạo ra các hợp chất dễ bay hơi thoát ra khỏi vật liệu. Đối với thành phần nguyên tố của TSH, hàm lượng carbon tăng lên khi nhiệt độ nhiệt phân tăng, trong khi hàm lượng oxy giảm đáng kể do quá trình carbon hóa tăng lên. Điều này phù hợp với các nghiên cứu trước đó (Yaashikaa et al., 2020; Kamarudin et al., 2021; Sarkar et al., 2024).



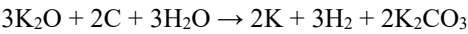
Hình 2. Hình thái của TSH từ rơm rạ nung ở các nhiệt độ khác nhau (Vo & Dang, 2025)

Ghi chú: (a) 500°C, (b) 600°C, (c) 700°C và (d) biến tính hóa học.

Để mở rộng các tính chất vật liệu, các phương pháp hoạt hoá hoá học được sử dụng trong các nghiên cứu. Có thể thấy rằng cấu trúc xốp của TSH được tăng đáng kể lên đến gần 6 lần đối với diện tích bề mặt riêng và 5 lần thể tích lỗ xốp. Sự gia tăng này

là do các phản ứng hoá học của các tác nhân hoạt hoá đến cấu trúc carbon của TSH, giúp mở rộng cấu trúc xốp của vật liệu (Sajjadi et al., 2018). Các phản ứng giữa kiềm và cấu trúc carbon của TSH bao gồm các phản ứng oxy hóa khử làm thay đổi cấu trúc

TSH và mở rộng cấu trúc xốp bằng các hiện tượng phân tách và phân hủy các lớp graphite dẫn tới việc phát triển các vi lỗ và trung lỗ trong vật liệu.



Hoạt hóa bằng acid giúp nâng cao tính chất bề mặt của vật liệu như cấu trúc xốp, nhóm chức bề mặt và các tính chất hóa học bề mặt. Tác nhân acid có thể loại bỏ thành phần tro, khoáng chất ra khỏi vật liệu, cũng như bổ sung thêm các nhóm chức oxy trên bề mặt của TSH. Sự thay đổi cấu trúc vật liệu xốp này cho thấy khả năng nâng cao dung lượng hấp phụ

của vật liệu, từ đó cải thiện hiệu quả xử lý các chất kháng sinh ô nhiễm (Sarkar et al., 2024).

Bảng 1. Phân tích thành phần các loại sinh khối từ phụ phẩm nông nghiệp (wt.%) (Liu & Balasubramanian, 2012; Vassilev et al., 2010)

Vật liệu	VM	FC	Tro
Rơm rạ	59,40	14,40	18,60
Vỏ trấu	56,10	17,20	16,10
Bã mía	76,60	11,10	1,90
Xơ dừa	80,90	11,00	8,10
Thân bắp	67,70	17,80	7,10

Bảng 2. Tính chất TSH từ các nguồn khác nhau

Vật liệu	S _{BET} (m ² /g)	V (cm ³ /g)	d _{pore} (nm)	C (wt.%)	O (wt.%)	C/O (w/w)	Tài liệu tham khảo
TSH bã mía 400	90,4	0,060	2,58	-	-		Nguyen and Nguyen (2024)
TSH bã mía 700	497,9	0,165	0,94	78,6	20,1	3,91	Le (2023)
TSH bã mía BT 400	525,1	0,290	2,24	63,5	25,7	2,47	(Nguyen & Nguyen, 2024)
TSH xơ dừa 700	348,2	0,159	1,05	84,5	15,4	5,49	(Phan, 2023)
TSH xơ dừa BT 700	765,8	0,306	0,98	27,6	42,5	0,65	(Phan, 2023)
TSH rơm rạ 500	68,7	0,050	1,16	59,8	21,4	2,79	(Dang & Truong, 2023)
TSH rơm rạ 700	149,3	0,078	1,18	56,0	24,3	2,31	(Dang & Truong, 2023)
TSH rơm rạ 900	411,1	0,200	1,55	54,6	17,9	3,05	(Dang & Truong, 2023)
TSH trấu 400	34,3	0,026	1,50	43,3	28,9	1,49	(Phan & Tran, 2024)
TSH trấu BT 400	1154,8	0,683	1,00	82,3	11,7	7,03	(Phan & Tran, 2024)
TSH trấu 500	108,8	0,098	1,48	78,3	19,7	3,9	(Le, 2024)
TSH lõi bắp 400	1,28	0,0037	0,78	71,54	24,94	2,87	(Chau & Nguyen, 2024)
TSH lõi bắp BT 400	989,14	0,61	2,71	77,87	20,63	3,78	
TSH Vỏ sấu riêng 500	5,61	0,007	2,77	79,31	17,21	4,61	(Mai, 2024)
TSH Vỏ sấu riêng BT 500	1678,52	0,846	5,03	77,43	21,26	3,64	(Mai, 2024)

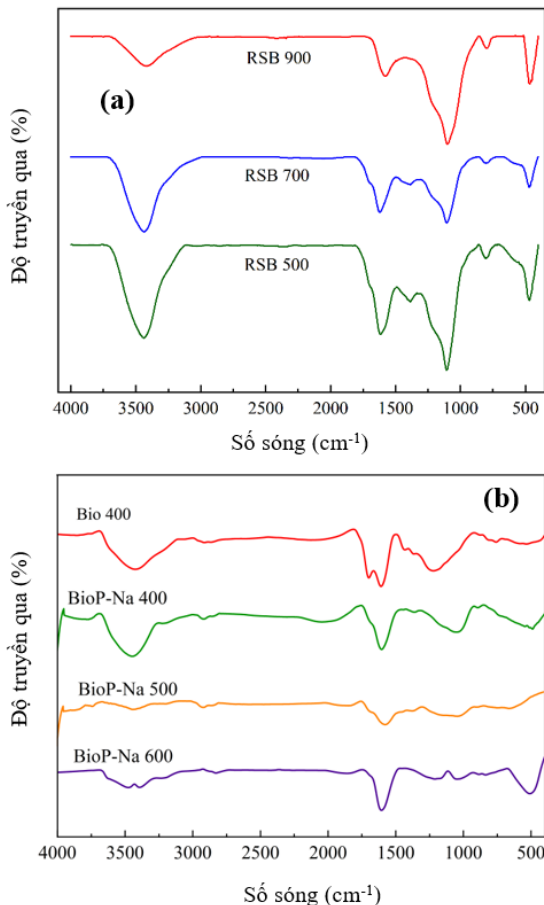
Ghi chú: TSH bã mía BT 400: than sinh học biến tính từ bã mía nhiệt phân ở 400°C.

2.2. Nhóm chức trên bề mặt vật liệu

Những nhóm chức cần thiết trên bề mặt vật liệu bao gồm những nhóm chức có oxy như carboxylic, hydroxyl, hoặc amine, amide và lactonic. Các nhóm chức này đóng vai trò rất quan trọng trong việc nâng cao hiệu quả hấp phụ của vật liệu. Yếu tố chính ảnh hưởng đến sự tồn tại của các nhóm chức trên bề mặt vật liệu là loại sinh khối và nhiệt độ nhiệt phân (Li et al., 2017). Kết quả phân tích thành phần nguyên tố của các loại TSH trong Bảng 2 cho thấy, tỷ lệ C/O của các loại TSH thay đổi tùy theo loại sinh khối và nhiệt độ xử lý. Từ đó, khi nhiệt độ nhiệt phân tăng thì tỷ lệ này tăng lên đáng kể, việc này cho thấy quá

trình carbon hóa tăng lên và các hợp chất dễ bay hơi phân hủy mang nhiều oxy thoát ra khỏi vật liệu. Sự giảm thành phần oxy trong TSH cũng làm giảm số lượng các nhóm chức có trên bề mặt vật liệu. Sự thay đổi các nhóm chức trên bề mặt vật liệu được xác nhận trong kết quả phân tích FT-IR ở Hình 3a (Dang & Truong, 2023). Khi nhiệt độ nhiệt phân tăng từ 500 đến 900°C, số lượng và cường độ các đỉnh dao động giảm đáng kể, cho thấy số lượng các nhóm chức giảm và một số nhóm chức bị mất đi ở nhiệt độ cao. Các nhóm chức hoá học này đóng vai trò rất quan trọng trong quá trình hấp phụ kháng sinh nhờ vào các tương tác liên phân tử và liên kết cộng hoá trị. Hình 3b cho thấy các nhóm chức thay đổi khi

biến tính với NaOH và H_3PO_4 , một số nhóm chức mới xuất hiện cũng như suy giảm (Chau & Nguyen, 2024).



Hình 3. Phân tích FT-IR của TSH

Ghi chú: (a) từ rơm rạ (b) từ lõi bắp ở các điều kiện khác nhau.

3. TIỀM NĂNG XỬ LÝ KHÁNG SINH CỦA TSH TỪ PHỤ PHẨM NÔNG NGHIỆP

3.1. Hấp phụ kháng sinh bằng TSH

Ô nhiễm kháng sinh trong nước ngày càng trở nên nghiêm trọng tại Việt Nam. Để xử lý các loại kháng sinh trong nước, có bốn quá trình được sử dụng hiện nay gồm quy trình truyền thống (lọc và lắng tiếp theo xử lý sinh học), quá trình oxy hóa nâng cao, công nghệ lọc màng, bùn hoạt tính, và hấp phụ (Xiang et al., 2019). Kháng sinh có thể được loại bỏ một phần thông qua các quá trình truyền thống, trong khi các phương pháp mới cho thấy khả năng xử lý hiệu quả hơn. Bên cạnh các quá trình khác, phương pháp hấp phụ có các ưu điểm vượt trội như có thể xử lý hiệu quả ở nồng độ thấp, dễ dàng

thực hiện ở quy mô lớn, chi phí thấp và có thể tận dụng nhiều loại chất thải khác nhau do những tính chất đáng chú ý của TSH là diện tích bề mặt riêng lớn, thể tích lỗ xốp cao, nhiều nhóm chức trên bề mặt và ái lực cao đối với các chất ô nhiễm hữu cơ là cơ sở để ứng dụng xử lý các chất ô nhiễm kháng sinh trong nước (Sen et al., 2023).

Những ưu điểm trên của TSH đã nhận được chú ý rất lớn hiện nay để xử lý các chất ô nhiễm hữu cơ, đặc biệt là các chất ô nhiễm kháng sinh trong nước (Xiang et al., 2019). Bên cạnh đó, kết quả các nghiên cứu cho thấy sự chọn lọc trong hấp phụ kháng sinh là một lợi thế lớn so với các loại vật liệu khác. Một số nghiên cứu khác đã được tiến hành nhằm thực hiện quá trình oxy hóa nâng cao trên nền TSH cho thấy khả năng để xử lý hoàn toàn các chất kháng sinh. Kết quả một số nghiên cứu gần đây cho thấy hiệu quả xử lý kháng sinh từ vật liệu TSH là khá cao, mở ra khả năng xử lý nước thải quy mô lớn. Các loại vật liệu khác nhau tạo ra TSH có đặc tính khác nhau, nên vật liệu TSH tương tác với kháng sinh ở mức độ khác nhau. Kết quả trong Bảng 2 cho thấy TSH từ sinh khối có khả năng loại bỏ hiệu quả các loại kháng sinh với dung lượng hấp phụ cao trên 35 mg/g. Vật liệu có dung lượng hấp phụ cao có thể giúp tăng hiệu quả xử lý kháng sinh trong khi tiết kiệm vật liệu sử dụng, giúp nâng cao tiềm năng ứng dụng quy mô lớn. Các vật liệu TSH được tạo ra bằng phương pháp nhiệt phân thông thường có giới hạn về các đặc tính cơ bản như diện tích bề mặt riêng, cấu trúc lỗ xốp và các nhóm chức bề mặt. Một số phương pháp biến tính vật lý hoặc hóa học được sử dụng để tăng cường các tính chất này của vật liệu từ đó nâng cao khả năng hấp phụ kháng sinh. Có thể thấy trong Bảng 2, TSH biến tính có dung lượng hấp phụ rất cao, có thể đạt đến hơn 580 mg/g. Điều này có được là do các tác nhân biến tính tác động đến cấu trúc vật liệu, mở rộng cấu trúc xốp và làm tăng các nhóm chức trên bề mặt vật liệu.

Sự tương tác giữa TSH và kháng sinh rất quan trọng ảnh hưởng đến hiệu quả quá trình hấp phụ. Quá trình hấp phụ kháng sinh lên bề mặt TSH gồm nhiều bước bao gồm khuếch tán kháng sinh từ dung dịch đến bề mặt vật liệu, từ đó kháng sinh sẽ được di chuyển vào cấu trúc xốp của vật liệu và cuối cùng là tương tác với các tâm hấp phụ. Tuy thuộc vào cấu trúc vật liệu và công thức hoá học của kháng sinh thì sẽ có các cơ chế hấp phụ khác nhau như trong Bảng 2. Nhìn chung, các cơ chế hấp phụ có thể là tương tác tĩnh điện dựa trên sự khác nhau về điện tích giữa vật liệu và chất kháng sinh; do trên bề mặt TSH có các nhóm chức có chứa oxy, hydro hoặc nito, các nhóm chức này có thể tạo liên kết hydro với những

nhóm trong cấu trúc của kháng sinh. Bên cạnh đó, các liên kết đôi trên cấu trúc TSH có thể tương tác với cấu trúc của kháng sinh dựa trên tương tác $\pi - \pi$. Khi đường kính lỗ xốp TSH lớn hơn đường kính phân tử của kháng sinh, các phân tử kháng sinh có thể đi sâu vào các lỗ xốp của vật liệu và bị giữ lại đó

(Liang et al., 2021). Liên kết hydro, tương tác $\pi - \pi$ được xác định là cơ chế hấp phụ chính để xử lý doxycycline and CIP bằng TSH có nguồn gốc từ rom rạ. Khả năng xử lý hai loại kháng sinh của loại vật liệu này đạt đến 432,90 mg/g cho doxycycline và 131,58 mg/g cho CIP (Zeng et al., 2018).

Bảng 3. Khả năng xử lý kháng sinh của TSH

Vật liệu	Loại kháng sinh	Dung lượng hấp phụ tối đa (mg/g)	Cơ chế hấp phụ có thể	Nguồn
TSH từ tre	Enrofloxacin	45,9	-	(Mullen et al., 2010)
	Ofloxacin	45,1		
TSH từ thân bắp	Tetracycline (TC)	49,56	Hấp phụ hóa học,	(Dai et al., 2019)
TSH từ rom rạ	Ciprofloxacin (CIP)	131,58	Liên kết hydro, tương tác $\pi - \pi$	(Zeng et al., 2018)
TSH BT từ vỏ hạt hướng dương	TC	429,3	Hấp phụ hóa học, khuếch tán ngoài và khuyến tán nội hạt	(Nguyen et al., 2023)
	CIP	361,6		
	Sulfamethoxazole (SMX)	251,3		
TSH BT từ tre	SMX	88,1	Liên kết hydro, tương tác $\pi - \pi$, Lewis acid – kiềm	(Ahmed et al., 2017)
TSH BT từ sợi cây cọ dầu	SMX	42,9	Tương tác tĩnh điện, liên kết hydro, tương tác $\pi - \pi$	(Diao et al., 2023)
TSH BT từ bã mía	TC	41,98	Hấp phụ vật lý, Tương tác tĩnh điện, tương tác $\pi - \pi$	(Hoang et al., 2022)
TSH biến tính từ gỗ	CIP	78,43	Hấp phụ hóa học	(Wakejo et al., 2022)
TSH BT từ rom rạ	Triclosan	587	-	(Liu et al., 2014)
TSH BT từ rom rạ	TC	552	liên kết hydro, tương tác tĩnh điện, tương tác $\pi - \pi$	(Chen et al., 2018)

3.2. Hiệu quả xử lý kháng sinh của một số loại vật liệu hấp phụ phổ biến

Khả năng hấp phụ kháng sinh phụ thuộc nhiều yếu tố khác nhau như loại vật liệu hấp phụ, loại và tính chất của kháng sinh, điều kiện xử lý và cơ chế hấp phụ. Trong đó, tính chất của vật liệu hấp phụ đóng vai trò rất quan trọng đến hiệu quả quá trình. Để áp dụng ở quy mô lớn, chi phí sản xuất vật liệu là một trong những yếu tố quan trọng nhất để đánh giá tính khả thi của quá trình. Trong thời điểm hiện tại, một số vật liệu hấp phụ từ tự nhiên hay tổng hợp có thể gồm than hoạt tính, silica, alumina, zeolite, nhựa trao đổi ion và graphene oxide. Mỗi loại vật liệu có các tính chất hóa lý khác nhau ảnh hưởng rất lớn đến hiệu quả và cơ chế hấp phụ. Than hoạt tính là một trong những loại vật liệu hiệu quả nhất, do có diện tích bề mặt riêng (khoảng 2000 – 3000 m²/g) và thể tích lỗ xốp rất lớn, nên có thể xử lý rất hiệu quả các chất hữu cơ ô nhiễm, trong đó có kháng sinh. Tuy nhiên, chi phí chế tạo cao, lỗ xốp dễ bị nghẽn và khó tái sử dụng, điều này làm giảm hiệu quả khi sử dụng. Các vật liệu zeolite có thể được sử dụng để

trao đổi ion hoặc hấp phụ, tuy nhiên các tỷ lệ Si/Al khác nhau có thể cho các ứng dụng khác nhau. Tuy nhiên, sự khó khăn khi khuếch tán do cấu trúc vi lỗ của vật liệu có thể làm giảm khả năng ứng dụng của vật liệu, bên cạnh chi phí sản xuất của khá cao (Malakootian et al., 2018).

Trong khi đó, vật liệu graphene cho thấy các tính chất vượt trội khi hấp phụ kháng sinh do diện tích bề mặt và cấu trúc xốp rất cao. Vật liệu graphene có nhược điểm là dễ đóng khối trong môi trường lỏng và chi phí sản xuất rất cao (Li et al., 2019). So với các loại vật liệu trên, vật liệu TSH có các ưu điểm quan trọng là thân thiện môi trường và chi phí sản xuất rất thấp do quá trình chế tạo đơn giản, và có nguồn gốc từ các phụ phẩm nông, lâm nghiệp. Bên cạnh đó, các tính chất hóa lý của TSH là diện tích bề mặt và cấu trúc lỗ xốp khá lớn, nhiều nhóm chức trên bề mặt giúp đạt quá trình hấp thụ các chất ô nhiễm hữu cơ cũng như kháng sinh hiệu quả cao. Khả năng thu hồi và tái sử dụng của TSH có thể đạt được 3 đến 4 lần mà vẫn duy trì hiệu quả xử lý có thể tăng thêm ưu thế của vật liệu. Ngoài ra, TSH có thể biến tính và kết hợp với các oxide kim loại khác

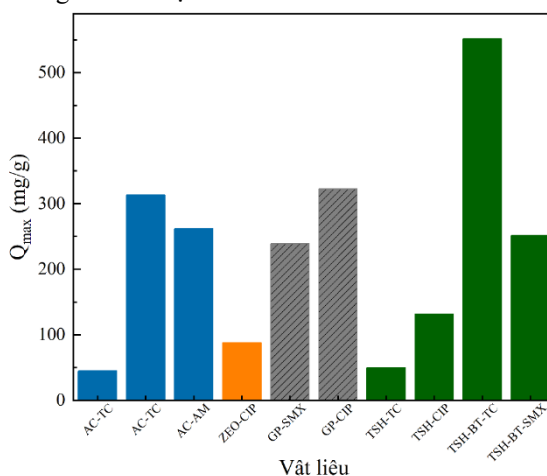
nhau và vật liệu khác nhau để xử lý kháng sinh bằng các phương pháp khác nhau như oxy hóa nâng cao, xúc tác.

Các báo cáo kết quả xử lý kháng sinh của các loại vật liệu khác nhau được thể hiện trong Hình 3. Nhìn chung, khả năng xử lý kháng sinh của các loại vật liệu là rất cao với dung lượng hấp phụ có thể đạt đến hơn 550 mg/g (Li et al., 2019; Al-Jubouri et al., 2022; Sharma et al., 2022). Có thể thấy, khả năng xử lý kháng sinh Tetracycline của TSH biến tính (TSH-BT-TC) là cao hơn rất nhiều so với than hoạt tính (AC-TC) và TSH không biến tính (TSH-TC). Trong khi đó, đối với kháng sinh Ciprofloxacin thì vật liệu graphene cho thấy khả năng rất cao với kết quả đạt đến hơn 320 mg/g, cao hơn đáng kể so với vật liệu zeolite (ZEO-CIP) và TSH không biến tính (TSH-CIP). Với kháng sinh SMX, vật liệu TSH biến tính (TSH-BT-SMX) có kết quả cao hơn so với vật liệu graphene (GP-SMX). Kết quả một nghiên cứu khác đã xác định dung lượng hấp phụ kháng sinh của TSH cao hơn đáng kể so với các loại vật liệu như carbon nanotubes, graphite và khoáng đất sét (Ahmed et al., 2015). Trong một nghiên cứu khác, việc đánh giá khả năng xử lý TC từ vỏ trấu biến tính bằng các hoá chất khác nhau đã được thực hiện (Liu et al., 2012). TSH nhiệt phân ở 500 - 500°C, được BT bằng KOH có khả năng hấp phụ gấp hơn 3,4 lần so với TSH không BT, trong khi dung lượng hấp phụ tối đa của TSH biến tính bằng H₂SO₄ cao gấp gần 1,4 lần. Sự cải thiện khả năng hấp phụ kháng sinh này là do diện tích bề mặt riêng của TSH BT vượt trội hơn nhiều.

Vật liệu TSH từ phụ phẩm nông nghiệp cho thấy tiềm năng rất lớn do hiệu quả xử lý cao, dung lượng hấp phụ cao, thân thiện môi trường và chi phí thấp. TSH được sản xuất từ quá trình nhiệt phân tốc độ chậm với quy trình thực hiện đơn giản, nguyên liệu sử dụng từ phụ phẩm nông nghiệp chi phí thấp, thân thiện với môi trường (Krasucka et al., 2021). Để nâng cao đặc tính vật liệu, TSH được biến tính hoá học bằng kiềm và/hoặc acid qua các quá trình một giai đoạn hoặc hai giai đoạn hoặc BT vật lý bằng hơi nước. So với các loại vật liệu tổng hợp khác, các hoá chất sử dụng để BT TSH với tỷ lệ thấp, chi phí thấp và quá trình đơn giản (Sajjadi et al., 2018). TSH có chi phí thấp hơn đáng kể với khoảng từ 0,35 đến 1,2 USD/kg, bằng khoảng 1/6 so với vật liệu than hoạt tính (Li et al., 2017; Du et al., 2023), khoảng 1/5 so với vật liệu zeolite từ tự nhiên và 1/2 so với vật liệu zeolite tổng hợp, trong khi vật liệu khung cơ kim có chi phí sản xuất trong khoảng 10 đến 70 USD/kg (Severino et al., 2025; Severino et al., 2021). Bên cạnh đó, việc sử dụng sinh khối từ phụ phẩm nông nghiệp giúp vật liệu TSH có ưu thế về thân thiện với

môi trường và chi phí thấp. Một trong những ưu điểm của TSH sản xuất từ sinh khối là có khả năng cô lập carbon để làm giảm phát thải các khí nhà kính (CO₂, CH₄) (Xie et al., 2022). Quá trình xử lý kháng sinh trong nước được thực hiện bằng quá trình hấp phụ cũng có những hạn chế như cần nhiều thời gian để thu hồi vật liệu trong nước và vật liệu hấp phụ ô nhiễm cần phải xử lý. Việc nâng cao dung lượng hấp phụ bằng quá trình hoạt hoá vật lý hoặc hoá học có thể làm tăng chi phí sản xuất và ô nhiễm thứ cấp (Sen et al., 2023).

Các kết quả nghiên cứu cho thấy TSH có khả năng xử lý hiệu quả kháng sinh trong nước, bên cạnh các yếu tố khác như chi phí sản xuất thấp, công nghệ đơn giản, và thân thiện với môi trường hơn (Krasucka et al., 2021). Để cải thiện đặc tính TSH, các phương pháp biến tính vật lý và hoá học được sử dụng để nâng cao hiệu quả hấp phụ kháng sinh (Sajjadi et al., 2018). Bên cạnh đó, TSH có thể kết hợp với kim loại hoặc vật liệu khác để xử lý kháng sinh bằng các phương pháp khác như oxy hoá nâng cao, xúc tác thúc đẩy quá trình phân huỷ kháng sinh (Ahmaruzzaman, 2021; Bartoli et al., 2023). Do đó, việc sử dụng TSH có nguồn gốc từ phụ phẩm nông, lâm nghiệp cho thấy tiềm năng rất lớn trong việc xử lý môi trường ở quy mô lớn, là một giải pháp hiệu quả, khả thi cao để giải quyết các vấn đề ô nhiễm kháng sinh ở Việt Nam.



Hình 4. Dung lượng hấp phụ lớn nhất kháng sinh của các loại vật liệu khác nhau

4. KẾT LUẬN

Ô nhiễm kháng sinh đang trở thành một trong những vấn đề nghiêm trọng ảnh hưởng đến môi trường sinh thái và sức khỏe con người trong thời gian gần đây. Việc xử lý ô nhiễm kháng sinh là một trong những quan tâm rất lớn hiện nay của các nhà

nghiên cứu và công nghiệp. Các phương pháp xử lý truyền thống không thể xử lý hiệu quả, còn với các cách tiếp cận mới chưa chứng minh được tính khả thi khi áp dụng ở quy mô lớn. TSH đang cho thấy tiềm năng rất lớn để giải quyết các vấn đề về ô nhiễm môi trường do có đặc tính tốt như diện tích bề mặt riêng lớn, cấu trúc xốp cao và nhiều nhóm chức trên bề mặt vật liệu. Quá trình sản xuất TSH đơn giản hơn và nguyên liệu có giá thành thấp có thể làm giảm đáng kể chi phí sản xuất (trong khoảng 0,35 đến 1,2 USD/kg). Bên cạnh đó, đặc tính thân thiện môi trường là những ưu điểm hấp dẫn của vật liệu này.

Các kết quả nghiên cứu cho thấy TSH có hiệu quả xử lý cao các loại kháng sinh khác nhau như tetracyclines, quinolones và sulfonamide với dung lượng hấp phụ cao nhất có thể đạt đến hơn 550 mg/g. So với các loại vật liệu khác, khả năng xử lý kháng

sinh của vật liệu từ TSH là rất tốt. Hơn nữa, các vật liệu có khả năng thu hồi và tái sử dụng nhiều lần mà hiệu quả xử lý vẫn suy giảm không đáng kể do vật liệu có cấu trúc ổn định trong quá trình sử dụng. Một trong những ưu điểm của TSH là có thể kết hợp với một số vật liệu khác để nâng cao hiệu quả xử lý kháng sinh thông qua quá trình khác như oxy hóa nâng cao, bên cạnh hấp phụ. Từ đó, TSH từ phụ phẩm nông nghiệp là một giải pháp hứa hẹn cho các vấn đề ô nhiễm môi trường từ các chất hữu cơ và kháng sinh ở quy mô lớn, cũng như nâng cao giá trị sản xuất nông nghiệp để đạt được các mục tiêu phát triển bền vững ở Việt Nam.

LỜI CẢM ƠN

Các tác giả chân thành cảm ơn Trường Đại học Cần Thơ đã hỗ trợ cơ sở vật chất và kinh phí thông qua đề tài cấp cơ sở (T2024-69).

TÀI LIỆU THAM KHẢO (REFERENCES)

- Ahmaruzzaman, M. (2021). Biochar based nanocomposites for photocatalytic degradation of emerging organic pollutants from water and wastewater. *Materials Research Bulletin*, 140, 111262.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2021.111262>
- Ahmed, M. B., Zhou, J. L., Ngo, H. H., Guo, W., Johir, M. A. H., & Sornalingam, K. (2017). Single and competitive sorption properties and mechanism of functionalized biochar for removing sulfonamide antibiotics from water. *Chemical Engineering Journal*, 311, 348-358.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.11.106>
- Ambaye, T. G., Vaccari, M., van Hullebusch, E. D., Amrane, A., & Rtimi, S. (2021). Mechanisms and adsorption capacities of biochar for the removal of organic and inorganic pollutants from industrial wastewater. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18(10), 3273-3294.
<https://doi.org/10.1007/s13762-020-03060-w>
- Bartoli, M., Giorcelli, M., & Tagliaferro, A. (2023). A Comprehensive Overview on Biochar-Based Materials for Catalytic Applications. *Catalysts*, 13(10).
<https://doi.org/10.3390/catal13101336>
- Chau, T. A., & Nguyen, T. Q. T. (2024). *Enhancing methyl violet removal performance of chemically modified biochar derived from corncob* (Bachelor's thesis). Can Tho University (in Vietnamese).
- Chen, T., Luo, L., Deng, S., Shi, G., Zhang, S., Zhang, Y., Deng, O., Wang, L., Zhang, J., Wei, L. (2018). Sorption of tetracycline on H3PO4 modified biochar derived from rice straw and swine manure. *Bioresource Technology*, 267, 431-437.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.07.074>
- Dai, Y., Liu, M., Sun, Y., Li, J., Jiang, Y., Li, S., Yue, W., Liu, Z. (2019). Adsorption characteristics of tetracycline on biochar from agricultural wastes. *Desalination and Water Treatment*, 151, 384-391.
<https://doi.org/https://doi.org/10.5004/dwt.2019.23829>
- Dang, T. N. C., & Trương, T. N. L. (2023). *Biochar preparation from rice straw and its application for Dibenzo(furan) removal* (Bachelor's thesis). Can Tho University (in Vietnamese).
- Diao, Y., Shan, R., Li, M., Gu, J., Yuan, H., & Chen, Y. (2023). Efficient Adsorption of a Sulfonamide Antibiotic in Aqueous Solutions with N-doped Magnetic Biochar: Performance, Mechanism, and Reusability. *ACS Omega*, 8(1), 879-892.
<https://doi.org/10.1021/acsomega.2c06234>
- Hoang, L. P., Nguyen, T. M. P., Van, H. T., Yilmaz, M., Hoang, T. K., Nguyen, Q. T., Vi, H. T. M., Nga, L. T. Q. (2022). Removal of Tetracycline from aqueous solution using composite adsorbent of ZnAl layered double hydroxide and bagasse biochar. *Environmental Technology & Innovation*, 28, 102914.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102914>
- Krasucka, P., Pan, B., Sik Ok, Y., Mohan, D., Sarkar, B., & Oleszczuk, P. (2021). Engineered biochar – A sustainable solution for the removal

- of antibiotics from water. *Chemical Engineering Journal*, 405, 126926.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126926>
- Le, T. H. (2024). *Evaluation of the effect of biochar on soil amendment* (Bachelor's thesis). Can Tho University.
- Le, T. N. L. (2023). *Biochar preparation from sugarcane bagasse, Durian Peels, coconut fiber, corn cob, and jackfruit peel for Basic Fuchsine removal* (Bachelor's thesis). Can Tho University (in Vietnamese).
- Liang, L., Xi, F., Tan, W., Meng, X., Hu, B., & Wang, X. (2021). Review of organic and inorganic pollutants removal by biochar and biochar-based composites. *Biochar*, 3(3), 255-281.
<https://doi.org/10.1007/s42773-021-00101-6>
- Liu, P., Liu, W.-J., Jiang, H., Chen, J.-J., Li, W.-W., & Yu, H.-Q. (2012). Modification of bio-char derived from fast pyrolysis of biomass and its application in removal of tetracycline from aqueous solution. *Bioresource Technology*, 121, 235-240.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.06.085>
- Liu, Y., Zhu, X., Qian, F., Zhang, S., & Chen, J. (2014). Magnetic activated carbon prepared from rice straw-derived hydrochar for triclosan removal [10.1039/C4RA11815D]. *RSC Advances*, 4(109), 63620-63626.
<https://doi.org/10.1039/C4RA11815D>
- Liu, Z., & Balasubramanian, R. (2012). Hydrothermal Carbonization of Waste Biomass for Energy Generation. *Procedia Environmental Sciences*, 16, 159-166.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.10.022>
- Mai, X. T. (2024). *Removal of basic Fuchsine in aqueous solution by activated biochar derived from Durian Peels* (Bachelor's thesis). Can Tho University (in Vietnamese).
- Mullen, C. A., Boateng, A. A., Goldberg, N. M., Lima, I. M., Laird, D. A., & Hicks, K. B. (2010). Bio-oil and bio-char production from corn cobs and stover by fast pyrolysis. *Biomass and Bioenergy*, 34(1), 67-74.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.09.012>
- Nguyen, N. M., Le, T.T.C, Huynh, H. L., Dang, G. H., Doan, T. D. V., Ho, P. Q. (2022). Biomass from agricultural wastes: Potentials and applications in renewable energy in the Mekong Delta (in Vietnamese). *CTU Journal of Science*, 58, 201-213 (in Vietnamese).
Doi:10.22144/ctu.jvn.2022.206
- Nguyen, T.-K.-T., Nguyen, T.-B., Chen, W.-H., Chen, C.-W., Kumar Patel, A., Bui, X.-T., Chen, L., Singhanian, R. R., Dong, C.-D. (2023). Phosphoric acid-activated biochar derived from sunflower seed husk: Selective antibiotic adsorption behavior and mechanism. *Bioresource Technology*, 371, 128593.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128593>
- Nguyen, T. T. L., & Nguyen, M. T. (2024). Enhancing Ciprofloxacin removal performance using chemically modified biochar from sugarcane bagasse (Bachelor's thesis). Can Tho University (in Vietnamese).
- Vo, N. H., & Dang, S. H. (2025). *Preparation of chemically modified biochar from rice straw for Ciprofloxacin removal* (Bachelor's thesis). Can Tho University (in Vietnamese).
- Ouda, M., Kadadou, D., Swaidan, B., Al-Othman, A., Al-Asheh, S., Banat, F., Hasan, S. W. (2021). Emerging contaminants in water bodies of the Middle East and North Africa (MENA): A critical review. *Science of the Total Environment*. 754 (1).
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142177>
- Phan, G. H., & Tran, T. N. (2024). *Crystal violet removal from aqueous solution by chemically modified biochar from rice husk* (Bachelor's thesis). Can Tho University (in Vietnamese).
- Phan, K. X. (2023). *Biochar preparation from coconut fiber for tetracycline removal* (Bachelor's thesis). Can Tho University (in Vietnamese).
- Sajjadi, B., Chen, W.-Y., & Egiebor, N. O. (2019). A comprehensive review on physical activation of biochar for energy and environmental applications. 35(6), 735-776.
<https://doi.org/doi:10.1515/revce-2017-0113> (Reviews in Chemical Engineering)
- Sajjadi, B., Zubatiuk, T., Leszczynska, D., Leszczynski, J., & Chen, W. Y. (2018). Chemical activation of biochar for energy and environmental applications: a comprehensive review. 35(7), 777-815.
<https://doi.org/doi:10.1515/revce-2018-0003>
- Sen, U., Esteves, B., Aguiar, T., & Pereira, H. (2023). Removal of Antibiotics by Biochars: A Critical Review. *Applied Sciences*, 13(21).
<https://doi.org/10.3390/app132111963>
- Severino, M. I., Freitas, C., Pimenta, V., Nouar, F., Pinto, M. L., & Serre, C. (2025). Cost Estimation of the Production of MIL-100(Fe) at Industrial Scale from Two Upscaled Sustainable Synthesis Routes. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 64(5), 2708-2718.
<https://doi.org/10.1021/acs.iecr.4c02618>

- Severino, M. I., Gkaniatsou, E., Nouar, F., Pinto, M. L., & Serre, C. (2021). MOFs industrialization: a complete assessment of production costs [10.1039/D1FD00018G]. *Faraday Discussions*, 231(0), 326-341.
<https://doi.org/10.1039/D1FD00018G>
- Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., & Vassileva, C. G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, 89(5), 913-933.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022>
- Wakejo, W. K., Meshasha, B. T., Kang, J. W., Chebude, Y., & Hua, M. (2022). Enhanced Ciprofloxacin Removal from Aqueous Solution Using a Chemically Modified Biochar Derived from Bamboo Sawdust: Adsorption Process Optimization with Response Surface Methodology. *Adsorption Science & Technology*, 2022, 2699530.
<https://doi.org/10.1155/2022/2699530>
- Xiang, Y., Xu, Z., Wei, Y., Zhou, Y., Yang, X., Yang, Y., Yang, J., Zhang, J., Luo L., Zhou, Z. (2019). Carbon-based materials as adsorbent for antibiotics removal: Mechanisms and influencing factors. *Journal of Environmental Management*, 237, 128-138.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.068>
- Xie, Y., Wang, L., Li, H., Westholm, L. J., Carvalho, L., Thorin, E., Yu Z., Yu, X., Skreiberg, Ø. (2022). A critical review on production, modification and utilization of biochar. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 161, 105405.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105405>
- Yaashikaa, P. R., Kumar, P. S., Varjani, S., & Saravanan, A. (2020). A critical review on the biochar production techniques, characterization, stability and applications for circular bioeconomy. *Biotechnology Reports*, 28, e00570.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00570>
- Zeng, Z.-w., Tan, X.-f., Liu, Y.-g., Tian, S.-r., Zeng, G.-m., Jiang, L.-h., Liu, S., Li, J., Liu, N., Yin, Z.-h. (2018). Comprehensive Adsorption Studies of Doxycycline and Ciprofloxacin Antibiotics by Biochars Prepared at Different Temperatures [Original Research]. *Volume 6 - 2018*.
<https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00080>