

ỨNG DỤNG TRÍ TUỆ NHÂN TẠO TRONG KỸ THUẬT QUẢN LÝ VÀ XỬ LÝ CHẤT THẢI

Aniebonam Obum Sabastine¹

Tóm tắt: Trước khủng hoảng rác thải toàn cầu đe dọa nghiêm trọng đến môi trường và sức khỏe cộng đồng, trí tuệ nhân tạo (AI) và học máy đã trở thành giải pháp đột phá cho vấn đề quản lý chất thải bền vững. AI đã chứng minh hiệu quả vượt trội khi nâng cao hiệu suất xử lý nước thải 30% và giảm chi phí 25% thông qua dự đoán và kiểm soát chất lượng theo thời gian thực. Trong quản lý chất thải rắn, robot kết hợp thị giác máy tính đạt độ chính xác trên 95% trong phân loại, tăng cường tái chế và tái sử dụng tài nguyên. Các ứng dụng IoT như thùng rác thông minh và tối ưu lộ trình thu gom giúp giảm đáng kể khí thải carbon và chi phí vận hành. Tuy nhiên, triển khai toàn cầu vẫn gặp nhiều rào cản do thiếu chuẩn hóa dữ liệu, hạn chế tài chính ở các nước đang phát triển và khan hiếm nhân lực chuyên môn. Để khai thác tối đa tiềm năng, cần sự hợp tác giữa chính phủ xây dựng tiêu chuẩn quốc tế, doanh nghiệp đầu tư công nghệ xanh và trường đại học đào tạo nguồn nhân lực, từ đó biến AI thành nền tảng then chốt cho xử lý chất thải bền vững và kinh tế tuần hoàn.

Từ khóa: Kỹ thuật xử lý chất thải, phát triển bền vững; quản lý chất thải; trí tuệ nhân tạo.

Abstract: Amid the global waste crisis that poses serious threats to the environment and public health, and given the limitations of conventional waste-treatment methods, artificial intelligence and machine learning have emerged as breakthrough solutions for sustainable waste management. AI has demonstrated outstanding effectiveness, improving wastewater treatment efficiency by 30% and reducing costs by 25% through real time prediction and quality control. In solid-waste management, AI-enabled robots combined with computer vision achieve classification accuracies of over 95%, thereby enhancing recycling and resource recovery. IoT applications, such as smart bins and optimized collection route systems, significantly reduce carbon emissions and operational costs. However, global implementation still faces multiple barriers, including lack of data standardization, limited financial capacity in developing countries, and shortages of skilled personnel. To fully realize the potential of these technologies, coordinated efforts are required: governments must establish international standards, enterprises need to invest in green technologies, and universities should train a qualified workforce - thus positioning AI as a key foundation for sustainable waste treatment and the circular economy.

¹ Cử nhân, Học viên cao học, Khoa Khoa học Môi trường, Đại học Nông Lâm Thái Nguyên.

Keywords: *Waste treatment technology; sustainable development; waste management; artificial intelligence.*

Nhận bài: 12/08/2025 Gửi phản biện: 22/08/2025 Duyệt đăng: 26/11/2025

1. Đặt vấn đề

Khủng hoảng rác thải toàn cầu đang đặt ra những thách thức cấp bách đối với môi trường và sức khỏe cộng đồng. Quá trình đô thị hóa diễn ra với tốc độ chưa từng có, cùng với công nghiệp hóa và sự gia tăng dân số bùng nổ đã làm gia tăng khối lượng chất thải vượt xa khả năng xử lý của các phương pháp truyền thống. Theo thống kê của Chương trình Môi trường Liên Hợp Quốc (UNEP), khối lượng chất thải rắn đô thị toàn cầu được dự báo sẽ tăng từ 2,1 tỷ tấn năm 2023 lên 3,8 tỷ tấn vào năm 2050. Xu hướng gia tăng này không chỉ tạo áp lực lớn lên hệ thống quản lý chất thải hiện có mà còn đẩy nhanh tình trạng ô nhiễm môi trường, phát thải khí nhà kính và cạn kiệt tài nguyên thiên nhiên.

Việc quản lý chất thải không hiệu quả đang dẫn đến hàng loạt hệ lụy nghiêm trọng. Ô nhiễm không khí, đất và nguồn nước đang diễn ra ở quy mô rộng, trong khi các bãi chôn lấp thải ra lượng lớn khí nhà kính góp phần làm trầm trọng thêm biến đổi khí hậu. Nước thải không được xử lý đúng cách chứa kim loại nặng, vi sinh vật gây bệnh và các chất dược phẩm độc hại, gây nguy cơ nghiêm trọng đến sức khỏe con người và hệ sinh thái. Đồng thời, việc thiếu đồng bộ trong hệ thống phân loại và xử lý chất thải dẫn đến lãng phí các tài nguyên quý giá vốn có thể được thu hồi để tái chế hoặc chuyển hóa thành năng lượng. Sự không thống nhất này không chỉ làm giảm hiệu quả kinh tế mà còn cản trở quá trình phát triển bền vững.

Trong bối cảnh đó, trí tuệ nhân tạo (AI) và máy học (ML) đang nổi lên như một xu hướng đổi mới mang tính đột phá trong quản lý chất thải. Nhiều quốc gia tiên tiến như Mỹ, Trung Quốc, Nhật Bản và các nước châu Âu đã bắt đầu tích hợp AI vào hệ thống xử lý chất thải, từ phân loại rác thải tự động, dự báo khối lượng chất thải, tối ưu hóa lộ trình thu gom, đến giám sát và vận hành nhà máy xử lý theo thời gian thực. Công nghệ AI hỗ trợ bảo trì dự đoán, tối ưu hóa quy trình và nâng cao hiệu quả trong xử lý nước thải, quản lý rác thải rắn cũng như xây dựng các hệ thống thành phố thông minh. Tuy nhiên, việc áp dụng AI cũng đặt ra nhiều thách thức, đặc biệt ở các quốc gia đang phát triển nơi thiếu vốn đầu tư, chuyên môn kỹ thuật hạn chế và dữ liệu chưa được chuẩn hóa. Bên cạnh đó, các vấn đề về đạo đức như quyền riêng tư dữ liệu, tính minh bạch của thuật toán và khả năng tiếp cận công nghệ cũng cần được xem xét kỹ lưỡng.

Nhận thức được tiềm năng to lớn của AI, cộng đồng khoa học quốc tế đã dành sự quan tâm đáng kể cho việc nghiên cứu và ứng dụng công nghệ này trong kỹ thuật xử lý chất thải. Số lượng nghiên cứu trong lĩnh vực này đã tăng trưởng theo cấp số nhân, với 93 công trình được công bố trong năm 2023, dựa trên phân tích 368 tài liệu từ cơ sở dữ liệu Scopus giai đoạn 2015-2024. Các tạp chí hàng đầu như *Chemosphere*, *Water Science and Technology* và *Journal of Environmental Management* đã trở thành diễn đàn quan trọng để chia sẻ những tiến bộ mới nhất, trong khi Trung Quốc, Ấn Độ

và Hoa Kỳ dẫn đầu về số lượng nghiên cứu được công bố. Trên cơ sở tổng quan các nghiên cứu đã được thực hiện, bài viết này nhằm giới thiệu các mô hình và phương pháp ứng dụng AI trong xử lý chất thải thông qua phân tích hệ thống các công trình khoa học tiêu biểu.

Bảng 1: Công nghệ AI trong ứng dụng xử lý

Loại công nghệ	Khu vực ứng dụng	Hiệu quả (%)	Giảm chi phí (%)
Mạng lưới Nơ-ron nhân tạo	Xử lý nước thải	25-35	20-30
Thuật toán di truyền	Tối ưu hóa quy trình	15-25	15-25
Học máy	Dự đoán chất lượng	30-40	25-35
Thị giác máy tính	Phân loại rác thải	85-95	40-50
Tích hợp IoT	Hệ thống giám sát	20-30	30-40

Nguồn: Tổng hợp từ nhiều nghiên cứu bao gồm Nagpal et al. (2024) và Bahramian et al. (2023)

2. Phương pháp nghiên cứu

Bài viết áp dụng phương pháp đánh giá hệ thống theo nguyên tắc PRISMA, thu thập dữ liệu từ Scopus, Web of Science, PubMed, IEEE Xplore và ScienceDirect trong giai đoạn 2015-2025. Các nghiên cứu được lựa chọn dựa trên tiêu chí trình bày ứng dụng AI gốc trong xử lý chất thải với kết quả định lượng rõ ràng. Dữ liệu được trích xuất và phân tích theo bốn chiều: hiệu suất kỹ thuật, khả năng kinh tế, lợi ích môi trường và khả năng mở rộng. Tổng hợp định tính xác định các mô hình và rào cản, trong khi phân tích định lượng đánh giá hiệu quả cụ thể của các công nghệ AI trong xử lý nước thải và phân loại chất thải rắn.

3. Kết quả và bàn luận

3.1. Ứng dụng AI trong xử lý chất thải

Xử lý nước thải là một trong những vấn đề thiết yếu nhằm bảo vệ môi trường và sức khỏe cộng đồng, nhưng các hệ thống truyền thống thường gặp phải những thách thức về hiệu quả và chi phí vận hành. Việc

ứng dụng trí tuệ nhân tạo (AI) và học máy (ML) đang mở ra những cơ hội mới để tối ưu hóa quy trình, dự đoán kết quả và giảm thiểu rủi ro trong quản lý nước thải. Thực tế cho thấy, nhiều quốc gia đã bước đầu triển khai các mô hình xử lý nước thải ứng dụng AI. Hình 1 cho thấy Bắc Mỹ và Châu Á - Thái Bình Dương đang dẫn đầu việc áp dụng công nghệ này. Ngược lại, Châu Phi và một số khu vực của Mỹ Latinh vẫn còn hạn chế do thiếu nguồn lực tài chính, cơ sở hạ tầng công nghệ chưa đồng bộ và mức độ sẵn sàng của thể chế còn thấp. Sự chênh lệch này phản ánh rõ nét khoảng cách công nghệ giữa các nước phát triển và đang phát triển, đồng thời cho thấy tiềm năng mở rộng đáng kể nếu có sự hỗ trợ phù hợp về chính sách và đầu tư.

Hình 1: Phân bố toàn cầu các cơ sở xử lý chất thải được hỗ trợ bởi AI



Nguồn: Compiled from global industry reports and research studies (2025).

Các công nghệ AI được ứng dụng trong xử lý nước thải rất đa dạng, bao gồm mạng nơ-ron nhân tạo, thuật toán di truyền và hệ thống lai. Các phương pháp này hỗ trợ phân tích dự đoán, giám sát thời gian thực và tối ưu hóa liều lượng hóa chất. Theo đó, mạng nơ-ron nhân tạo dự đoán chất lượng nước thải với độ chính xác cao, trong khi thuật toán di truyền tối ưu hóa quá trình sục khí, giảm thiểu cả hóa chất và năng lượng sử dụng. Rừng ngẫu nhiên và máy vectơ hỗ trợ đã đạt được độ chính xác dự đoán trên 90%

trong một số nghiên cứu.

Hiệu quả của việc ứng dụng AI trong xử lý nước thải đã được chứng minh rõ ràng qua nhiều nghiên cứu và triển khai thực tế tại một số quốc gia trên thế giới. Theo đó, các hệ thống được tăng cường AI luôn vượt trội hơn các phương pháp truyền thống trên nhiều khía cạnh. Cụ thể, hiệu suất xử lý được cải thiện từ 25% đến 30%, đồng thời chi phí vận hành giảm từ 15% đến 25% nhờ tối ưu hóa việc sử dụng hóa chất và năng lượng. Độ chính xác trong dự đoán chất lượng nước thải đạt trên 90% trong nhiều nghiên cứu, cho phép các nhà máy duy trì tuân thủ nghiêm ngặt các tiêu chuẩn môi trường.

Mặc dù mang lại nhiều lợi ích đáng kể, việc triển khai AI trong xử lý nước thải vẫn đối mặt với nhiều thách thức và hạn chế cần được giải quyết. Vấn đề lớn nhất là chất lượng dữ liệu, do nhiều cơ sở thiếu hệ thống thu thập dữ liệu đầy đủ, liên tục và chuẩn hóa, đặc biệt tại các quốc gia đang phát triển nơi hạ tầng cảm biến còn hạn chế. Sự đa dạng và phức tạp trong thành phần nước thải khiến việc xây dựng các mô hình AI có tính tổng quát cao trở nên khó khăn, đòi hỏi phải tinh chỉnh và huấn luyện lại mô hình cho từng bối cảnh cụ thể. Chi phí đầu tư ban đầu cao cho cảm biến cơ sở hạ tầng máy tính và phần mềm AI tạo rào cản tài chính đáng kể, đặc biệt đối với các cơ sở quy mô nhỏ và vừa hoặc các quốc gia có nguồn lực hạn chế. Đồng thời, thiếu hụt nhân lực có chuyên môn về cả kỹ thuật môi trường lẫn công nghệ AI là một trở ngại trong việc vận hành, bảo trì và phát triển hệ thống.

Ngoài ra, khả năng diễn giải của các mô hình học sâu vẫn còn hạn chế, gây khó khăn trong việc giải thích quyết định của hệ thống cho các nhà quản lý và cơ quan chức năng. Cuối cùng, các vấn đề về bảo mật dữ

liệu, quyền riêng tư và khả năng tương thích giữa các hệ thống công nghệ khác nhau cũng cần được xem xét kỹ lưỡng để đảm bảo tính an toàn và liên tục trong vận hành. Những thách thức này làm nổi bật nhu cầu cấp thiết về các chính sách hỗ trợ, khuôn khổ đầu tư phù hợp và sự hợp tác quốc tế nhằm thu hẹp khoảng cách công nghệ và đẩy mạnh ứng dụng AI trong xử lý nước thải trên phạm vi toàn cầu.

3.2. Ứng dụng AI trong quản lý chất thải rắn

Quản lý chất thải rắn (SWM) là một trong những lĩnh vực ghi nhận nhiều đột phá nhờ việc ứng dụng trí tuệ nhân tạo trong những năm gần đây. Công nghệ AI được ứng dụng trong quản lý chất thải rắn điển hình là hệ thống robot được trang bị thị giác máy tính, đạt độ chính xác phân loại trên 95%. Hệ thống này có thể nhận dạng và phân loại nhựa, kim loại và giấy trong các dòng rác thải hỗn hợp nhanh hơn và đáng tin cậy hơn so với công nhân. Tại châu Âu, các dự án thí điểm quy mô lớn đã cho thấy sự gia tăng đáng kể về tỷ lệ tái chế và giảm thiểu ô nhiễm. Rác thải xây dựng và phá dỡ (C&D), vốn khó xử lý theo truyền thống, cũng được hưởng lợi. Các mô hình AI được áp dụng cho các hệ thống phân loại C&D có thể nhận dạng các vật liệu như bê tông, gỗ và kim loại, cho phép thu hồi để tái sử dụng. Một nghiên cứu điển hình do Dodamegama và cộng sự (2023) báo cáo cho thấy hiệu quả cải thiện hơn 20% so với phương pháp phân loại thông thường.

Cùng với đó, công nghệ blockchain ngày càng được tích hợp với các hệ thống AI trong quản lý chất thải rắn. Sự kết hợp này mang lại khả năng truy xuất nguồn gốc chất thải, đảm bảo tính minh bạch từ khâu phát sinh đến khâu xử lý cuối cùng. Các thành

phổ ở Trung Quốc và Châu Âu đã thí điểm theo dõi chất thải dựa trên blockchain, giảm thiểu tình trạng đổ rác thải trái phép và đảm bảo vật liệu tái chế được chuyển đến các cơ sở phù hợp.

Hiệu quả của việc ứng dụng AI trong quản lý chất thải rắn đã được chứng minh qua nhiều nghiên cứu và triển khai thực tế. Hệ thống AI giúp giảm chi phí nhân công bằng cách tự động hóa việc phân loại và giảm thiểu sai sót liên quan đến xử lý thủ công. Hệ thống robot và thị giác, mặc dù ban đầu tốn kém, nhưng về lâu dài có thể tiết kiệm chi phí nhờ tăng hiệu suất và tỷ lệ thu hồi vật liệu cao hơn. Các nghiên cứu cho thấy khả năng thu hồi được cải thiện từ 15–25%, mang lại lợi ích cả về kinh tế lẫn môi trường.

Tuy nhiên, việc triển khai AI trong quản lý chất thải rắn vẫn đối mặt với nhiều thách thức và hạn chế đáng kể. Hệ thống robot đòi hỏi đầu tư vốn đáng kể, hạn chế việc áp dụng ở các khu vực đang phát triển. Sự biến động lớn trong dòng chất thải cũng làm phức tạp việc đào tạo AI, vì các mô hình phải thích ứng với các phương pháp xử lý rác thải khác nhau theo văn hóa và khu vực. Việc bảo trì và hiệu chuẩn cảm biến và cánh tay robot làm tăng thêm chi phí vận hành.

Trí tuệ nhân tạo (AI) đang định hình lại việc quản lý chất thải rắn bằng cách tự động hóa việc phân loại, cải thiện tỷ lệ thu hồi và tăng cường tính minh bạch thông qua công nghệ blockchain. Mặc dù vẫn còn nhiều rào cản về kỹ thuật và tài chính, đặc biệt là ở các nước thu nhập thấp, nhưng những cải thiện đã được chứng minh về hiệu quả và trách nhiệm giải trình đã làm nổi bật vai trò quan trọng của AI trong việc thúc đẩy quản lý chất thải rắn bền vững.

3.3. Ứng dụng AI trong giám sát môi trường và phân tích dự đoán

Trí tuệ nhân tạo (AI) kết hợp với các hệ thống giám sát dựa trên cảm biến đã góp phần tăng cường giám sát môi trường trong quản lý chất thải. Bằng cách phân tích dữ liệu thời gian thực từ các thiết bị IoT, các nền tảng AI có khả năng dự đoán xu hướng ô nhiễm và phát hiện các bất thường mà các hệ thống truyền thống có thể bỏ sót. Điều này cho phép can thiệp kịp thời, giảm thiểu rủi ro ô nhiễm và hỏng hóc thiết bị. Trong lĩnh vực xử lý nước thải, các mô hình dự đoán dự báo nhu cầu oxy sinh học (BOD), nhu cầu oxy hóa học (COD) và mức độ dinh dưỡng với độ chính xác cao. Những dự báo này hỗ trợ điều chỉnh thời gian thực đối với quá trình sục khí và định lượng, cải thiện chất lượng xử lý và tuân thủ các tiêu chuẩn xả thải. Tương tự, tại các cơ sở xử lý chất thải rắn, các hệ thống AI giám sát chất lượng không khí gần các bãi chôn lấp và lò đốt, phát hiện nồng độ khí mê-tan, CO₂ hoặc các hạt tăng cao. Những thông tin chi tiết này cho phép các nhà quản lý hành động trước khi ô nhiễm vượt quá ngưỡng quy định.

Bảo trì dự đoán là một ứng dụng quan trọng khác của AI trong quản lý chất thải. Các hệ thống AI phân tích dữ liệu vận hành từ thiết bị để nhận diện các dấu hiệu báo trước khả năng hỏng hóc. Ví dụ, cảm biến độ rung và nhiệt độ trên máy bơm hoặc máy nén cung cấp tín hiệu mà các mô hình học máy sử dụng để lên lịch bảo trì trước khi xảy ra sự cố. Điều này làm giảm thời gian ngừng hoạt động, kéo dài tuổi thọ thiết bị và giảm chi phí sửa chữa. Giám sát thông minh cũng tăng cường bảo vệ hệ sinh thái.

Các dự án thí điểm ở Trung Quốc đã chứng minh các nền tảng hỗ trợ AI tích hợp giám sát chất lượng nước với dữ liệu khí

tượng, dự đoán thời điểm các cơn bão có thể làm quá tải các hệ thống xử lý. Bằng cách dự đoán những vấn đề này, các nhà quản lý có thể kích hoạt các biện pháp dự phòng, ngăn chặn việc xả nước thải chưa qua xử lý ra sông hồ. Bên cạnh những lợi ích vượt trội, việc triển khai AI trong giám sát môi trường và bảo trì dự đoán vẫn đối mặt với nhiều thách thức. Dữ liệu từ các cảm biến có thể không nhất quán, đòi hỏi phải xử lý sơ bộ mạnh mẽ. Việc tích hợp trên các nền tảng vẫn còn hạn chế, đặc biệt là khi kết hợp dữ liệu môi trường, công nghiệp và đô thị. Cuối cùng, nhu cầu về các nhà điều hành có kỹ năng để diễn giải các kết quả AI thường bị đánh giá thấp.

3.4. Một số rào cản của việc ứng dụng AI vào kỹ thuật xử lý chất thải

Mặc dù trí tuệ nhân tạo (AI) cho thấy tiềm năng mạnh mẽ trong kỹ thuật xử lý chất thải, việc áp dụng công nghệ này đang phải đối mặt với những thách thức đáng kể trên phạm vi toàn cầu. Những rào cản này khác nhau tùy theo khu vực và trình độ phát triển, ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu quả triển khai và khả năng mở rộng quy mô của các hệ thống AI trong quản lý chất thải.

Theo đó, chi phí ban đầu cao vẫn là rào cản đáng kể nhất, đặc biệt là ở các nước đang phát triển. Các hệ thống ứng dụng AI đòi hỏi đầu tư vào cảm biến, cơ sở hạ tầng IoT, tài nguyên điện toán và nhân sự lành nghề. Mặc dù đã có những ghi nhận về tiết kiệm chi phí vận hành, các thành phố có ngân sách hạn hẹp vẫn gặp khó khăn trong việc chi trả các chi phí ban đầu. Các cơ chế tài chính như quan hệ đối tác công tư và trái phiếu xanh vẫn chưa được phát triển ở nhiều khu vực.

Hai là, giới hạn về kỹ thuật và dữ liệu. Dữ liệu đáng tin cậy là yếu tố thiết yếu cho đào tạo AI, tuy nhiên nhiều cơ sở lại vận

hành với bộ dữ liệu không đầy đủ, không nhất quán hoặc chất lượng thấp. Việc thiếu dữ liệu, cảm biến trục trặc và thiếu giao thức chuẩn hóa làm giảm độ tin cậy của các mô hình. Việc thiếu các khuôn khổ chung để chia sẻ dữ liệu cũng cản trở khả năng tương tác giữa các hệ thống. Ở một số khu vực, cơ sở hạ tầng kỹ thuật số cơ bản còn thiếu thốn, cản trở việc áp dụng AI.

Ba là, rào cản về nguồn nhân lực chất lượng cao. Việc triển khai AI đòi hỏi các kỹ sư, nhà khoa học dữ liệu và người vận hành lành nghề được đào tạo về cả quản lý chất thải và phân tích nâng cao. Nhiều quốc gia đang phát triển với các chương trình đào tạo còn hạn chế đang thiết hụt lực lượng quan trọng này.

Bốn là, các vấn đề về đạo đức và quản trị. Các mối quan ngại về đạo đức bao gồm quyền riêng tư dữ liệu, tính minh bạch của thuật toán và an ninh mạng. Bản chất “hộp đen” của một số mô hình học sâu gây khó khăn cho các cơ quan quản lý và nhà điều hành, những người có thể ngần ngại tin tưởng vào kết quả mà họ không thể diễn giải. Rủi ro an ninh mạng ngày càng gia tăng khi các hệ thống IoT mở rộng, khiến mạng lưới quản lý chất thải dễ bị tấn công.

Năm là, phân bố toàn cầu không đồng đều về điều kiện giữa các quốc gia trong việc ứng dụng AI trong xử lý chất thải. Những bất bình đẳng này có nguy cơ làm gia tăng khoảng cách phát triển bền vững toàn cầu. Nếu không có sự hợp tác quốc tế có mục tiêu, các nước đang phát triển có thể bỏ lỡ cơ hội giảm phát thải và cải thiện sức khỏe cộng đồng thông qua quản lý chất thải bằng AI.

4. Kết luận và khuyến nghị

AI không còn là một công cụ thử nghiệm trong xử lý chất thải mà đã được chứng minh là một yếu tố thúc đẩy phát triển

bền vững. Với các chính sách, khoản đầu tư và nguồn nhân lực phù hợp, AI có thể trở thành nền tảng cho những nỗ lực toàn cầu nhằm quản lý chất thải một cách có trách nhiệm, giảm thiểu tác động môi trường và thúc đẩy nền kinh tế tuần hoàn. Con đường phía trước nằm ở việc chuyển đổi các dự án thí điểm hiện tại thành các tiêu chuẩn toàn cầu của tương lai - nơi chất thải được định nghĩa lại là cơ hội, và công nghệ trở thành động lực cho cả khả năng phục hồi kinh tế và môi trường.

Để khai thác hết tiềm năng của AI trong xử lý chất thải, cần có sự phối hợp nỗ lực từ nhiều bên liên quan. Cụ thể, các công ty quản lý chất thải nên bắt đầu áp dụng AI thông qua các dự án thí điểm chứng minh kết quả có thể đo lường được trước khi mở rộng quy mô. Đầu tư vào cảm biến IoT, hệ thống bảo trì dự đoán và phân loại bằng robot sẽ mang lại hiệu quả và tiết kiệm chi phí lâu dài. Các nhà lãnh đạo ngành cũng nên hợp tác với các nhà cung cấp công nghệ để cùng phát triển các giải pháp tùy chỉnh phù hợp với dòng chất thải và bối cảnh hoạt động tại địa phương. Tích hợp blockchain mang đến

cơ hội nâng cao trách nhiệm giải trình và tính minh bạch trong chuỗi cung ứng quản lý chất thải. Các trường đại học và cơ sở đào tạo cần mở rộng chương trình giảng dạy tích hợp AI, học máy và kỹ thuật môi trường. Các chương trình xây dựng năng lực là rất cần thiết để đào tạo thế hệ kỹ sư và nhà điều hành tiếp theo, những người có thể quản lý hiệu quả các hệ thống AI. Các cơ sở nghiên cứu cũng nên tập trung vào việc phát triển các mô hình AI nhẹ, dễ triển khai, phù hợp với các bối cảnh hạn chế về nguồn lực, đảm bảo các nước đang phát triển có thể hưởng lợi từ công nghệ này.

Sự hội tụ của AI, IoT và kỹ thuật môi trường mang đến một cơ hội lịch sử để biến rác thải từ một gánh nặng thành một nguồn tài nguyên. Để đạt được sự chuyển đổi này, không chỉ cần đổi mới công nghệ mà còn cần cả quản trị, đầu tư và giáo dục. Sự hợp tác giữa các chính phủ, ngành công nghiệp và học viện sẽ đảm bảo việc áp dụng AI mang tính toàn diện và công bằng, thu hẹp khoảng cách giữa các khu vực phát triển và đang phát triển.

Tài liệu tham khảo

1. Bahramian, M., Dereli, R. K., Zhao, W. Q., Giberti, M., & Casey, E. (2023). Data to intelligence: the role of data-driven models in waste-water treatment. *Expert Systems with Applications*. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.119453>
2. Dodamegama, S., Hou, L., Asadi, E., Zhang, G., & Setunge, S. (2023). Revolutionizing construction and demolition waste sorting: Insights from artificial intelligence and robotic applications. *Resources, Conservation and Recycling*, 202, 107375. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107375>
3. Nagpal, M., Siddique, M. A., Sharma, K., Sharma, N., & Mittal, A. (2024). Optimizing waste-water treatment through artificial intelligence: recent advances and future prospects. *Water Science & Technology*, 90(3), 731–757. <https://doi.org/10.2166/wst.2024.259>