

CHROMIUM CONTAMINATION IN WASTEWATER FROM MINING: A MINIREVIEW

Nguyen Thi Minh Phuong

Duy Tan University

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 02/01/2025	This study focuses on chromium pollution, particularly hexavalent chromium, resulting from mining and chemical industries in Vietnam, which poses significant threats to the environment and public health. By comprehensively reviewing existing literature and data, the research evaluates the sources, distribution, and impacts of chromium contamination while assessing various treatment methods, including chemical precipitation, adsorption, and advanced membrane technologies. Findings reveal that Cr(VI) concentrations in industrial wastewater frequently exceed permissible limits by 5–10 times, jeopardizing water resources, ecosystems, and human health. Although effective treatment solutions, such as chemical precipitation (efficiency >95%), adsorption (98%), and membrane technologies (up to 99%), are available, their implementation faces challenges due to high costs and weak environmental management. The study emphasizes the necessity of stricter regulations, enhanced monitoring, and international collaboration to develop sustainable treatment technologies. Ultimately, the research underscores the importance of integrated approaches combining advanced technologies, rigorous policy enforcement, and public awareness to mitigate Cr(VI) pollution, protect environmental and public health, and promote sustainable development in Vietnam.
Revised: 17/02/2025	
Published: 19/02/2025	
KEYWORDS	
Chromium pollution	
Cr(VI) and toxicity	
Industrial wastewater treatment	
Sustainable technologies	
Environmental management	

Ô NHIỄM CRÔM TRONG NƯỚC THẢI TỪ KHAI THÁC KHOÁNG SẢN: MỘT BÀI ĐÁNH GIÁ NGẮN

Nguyễn Thị Minh Phương

Đại học Duy Tân

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 02/01/2025	Nghiên cứu này tập trung vào vấn đề ô nhiễm crôm, đặc biệt là crôm hóa trị sáu (Cr(VI)), phát sinh từ các ngành công nghiệp khai thác khoáng sản và hóa chất tại Việt Nam, gây ra những mối đe dọa nghiêm trọng đối với môi trường và sức khỏe con người. Thông qua việc tổng hợp và đánh giá tài liệu hiện có, nghiên cứu phân tích nguồn gốc, sự phân bố và tác động của ô nhiễm Cr, đồng thời đánh giá các phương pháp xử lý như kết tủa hóa học, hấp phụ và công nghệ màng tiên tiến. Kết quả cho thấy, nồng độ Cr(VI) trong nước thải công nghiệp thường vượt giới hạn cho phép từ 5–10 lần, đe dọa nghiêm trọng đến nguồn nước, hệ sinh thái và sức khỏe cộng đồng. Dù các giải pháp xử lý hiệu quả, như kết tủa hóa học (hiệu suất >95%), hấp phụ (98%) và công nghệ màng (lên đến 99%), đã được đề xuất, việc triển khai vẫn gặp khó khăn do chi phí cao và quản lý môi trường yếu kém. Nghiên cứu nhấn mạnh sự cần thiết của các quy định chặt chẽ hơn, tăng cường giám sát và hợp tác quốc tế để phát triển các công nghệ xử lý bền vững. Cuối cùng, nghiên cứu khẳng định tầm quan trọng của việc kết hợp các công nghệ tiên tiến, thực thi chính sách nghiêm ngặt và nâng cao nhận thức cộng đồng nhằm giảm thiểu ô nhiễm Cr(VI), bảo vệ môi trường và sức khỏe con người, đồng thời thúc đẩy phát triển bền vững tại Việt Nam.
Ngày hoàn thiện: 17/02/2025	
Ngày đăng: 19/02/2025	
TỪ KHÓA	
Ô nhiễm crôm	
Cr(VI) và độc tính	
Xử lý nước thải công nghiệp	
Công nghệ bền vững	
Quản lý môi trường	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.11808>

Email: nguyentminhphuong@dtu.edu.vn

<http://jst.tnu.edu.vn>

139

Email: jst@tnu.edu.vn

1. Giới thiệu

Khai thác khoáng sản đóng vai trò quan trọng trong phát triển kinh tế Việt Nam, cung cấp nguyên liệu thiết yếu cho các ngành công nghiệp và đóng góp lớn vào GDP. Năm 2022, ngành khai khoáng chiếm khoảng 7,1% GDP với giá trị sản xuất hơn 406.000 tỷ đồng, trong đó xuất khẩu dầu thô và than đá đóng góp gần 10% tổng kim ngạch xuất khẩu [1]. Ngành này không chỉ tạo việc làm cho hơn 400.000 lao động trực tiếp mà còn hàng triệu lao động gián tiếp, đồng thời thúc đẩy phát triển cơ sở hạ tầng tại các khu vực khai thác [2]. Tuy nhiên, sự phát triển bền vững trong ngành khai thác khoáng sản là một thách thức lớn, đòi hỏi phải chú trọng đến bảo vệ môi trường và quản lý tài nguyên một cách hiệu quả. Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng việc khai thác khoáng sản có thể gây ra những tác động tiêu cực đến môi trường, như ô nhiễm nước mặt và nước ngầm, cũng như suy giảm chất lượng đất [3]. Do đó, việc áp dụng các phương pháp khai thác có trách nhiệm và bền vững là cần thiết để giảm thiểu những tác động này. Việc tích hợp các khái niệm sinh thái công nghiệp vào quản lý chất thải và thực hiện các hoạt động phục hồi sau khai thác là những biện pháp quan trọng để đảm bảo tính bền vững trong ngành [4], [5]. Ngoài ra, việc phát triển công nghệ xanh trong khai thác khoáng sản cũng là một yếu tố quan trọng. Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng việc cải thiện hiệu suất và tính bền vững của các phương pháp khai thác có thể đạt được thông qua đổi mới công nghệ và tối ưu hóa quy trình khai thác [6]. Hơn nữa, việc thực hiện các báo cáo bền vững trong ngành khai thác khoáng sản cũng đóng vai trò quan trọng trong việc nâng cao nhận thức về trách nhiệm xã hội và môi trường của các công ty khai thác [7], [8].

Ô nhiễm môi trường, đặc biệt là ô nhiễm crôm (Cr), là một vấn đề nghiêm trọng và ngày càng gia tăng do hoạt động khai thác khoáng sản và các ngành công nghiệp khác tại Việt Nam. Crôm tồn tại chủ yếu ở hai dạng: Cr(III) và Cr(VI). Trong đó, Cr(VI) được biết đến với độc tính cao, có khả năng gây hại cho sức khỏe con người và môi trường. Theo các nghiên cứu, Cr(VI) có thể gây ra các bệnh nghiêm trọng, bao gồm ung thư, khi xâm nhập vào cơ thể qua đường tiêu hóa, hô hấp hoặc tiếp xúc với da [9], [10]. Theo Ứng Thị Thúy Hà và cộng sự [11], Cr(VI) có độc tính cao hơn nhiều so với Cr(III), điều này phản ánh khả năng vượt qua màng tế bào và gắn kết với protein nội bào, dẫn đến mức độ độc hại cao hơn. Cr(VI) có khả năng gây ra các tổn thương di truyền nghiêm trọng trong tế bào, bao gồm việc tạo ra các adduct DNA, đứt gãy DNA, và các liên kết giữa DNA và protein, từ đó dẫn đến sự không ổn định của bộ gen [12]. Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng Cr(III) có khả năng thẩm thấu màng tế bào yếu hơn và không thể vượt qua màng tế bào, do đó, nó thường bị giữ lại trong tế bào mà không gây ra các tác động độc hại tương tự như Cr(VI). Sự khác biệt này trong tính chất độc hại giữa hai dạng crôm đã được xác nhận qua nhiều nghiên cứu [9], [10], [12], cho thấy Cr(VI) có thể gây ra các phản ứng miễn dịch và các vấn đề sức khỏe nghiêm trọng. Ngoài ra, ô nhiễm crôm cũng có liên quan đến các hoạt động khai thác khoáng sản, đặc biệt là khai thác than, nơi mà việc xả thải nước thải chứa crôm có thể dẫn đến ô nhiễm nguồn nước và đất [13]. Việc quản lý ô nhiễm crôm trong các ngành công nghiệp và khai thác khoáng sản là rất cần thiết để bảo vệ sức khỏe cộng đồng và môi trường. Các biện pháp như cải thiện quy trình sản xuất, áp dụng công nghệ xanh và thực hiện các quy định nghiêm ngặt về xả thải là cần thiết để giảm thiểu tác động tiêu cực của ô nhiễm crôm [5].

Tại Việt Nam, quá trình công nghiệp hóa và đô thị hóa diễn ra nhanh chóng đã dẫn đến sự gia tăng các nguồn thải chứa crôm, đặc biệt từ các ngành công nghiệp như cơ khí, điện tử và thuộc da. Nước thải từ các ngành này thường chứa hàm lượng crôm vượt quá tiêu chuẩn cho phép, góp phần làm ô nhiễm nguồn nước và đất [14]. Theo báo cáo của Ngân hàng Thế giới, nếu không giải quyết các thách thức về ô nhiễm nguồn nước, trong đó có ô nhiễm crôm, Việt Nam có thể giảm đến 6% GDP hàng năm vào năm 2035 [15]. Điều này không chỉ ảnh hưởng đến sức khỏe cộng đồng mà còn gây thiệt hại kinh tế nghiêm trọng. Ô nhiễm Cr không chỉ ảnh hưởng đến môi trường mà còn tác động tiêu cực đến các hoạt động kinh tế, đặc biệt là trong lĩnh vực nông nghiệp và du lịch. Nguồn nước ô nhiễm có thể làm giảm năng suất cây trồng và ảnh hưởng đến chất lượng sản phẩm nông nghiệp, từ đó làm giảm

thu nhập của nông dân và gây ra bất ổn xã hội. Hơn nữa, ô nhiễm môi trường cũng có thể làm giảm sức hấp dẫn của các điểm đến du lịch, ảnh hưởng đến ngành du lịch, một trong những ngành kinh tế mũi nhọn của Việt Nam. Để giảm thiểu ô nhiễm crôm, cần áp dụng các biện pháp quản lý chặt chẽ, bao gồm kiểm soát nguồn thải, áp dụng công nghệ xử lý nước thải tiên tiến và tăng cường giám sát môi trường. Các công nghệ xử lý nước thải hiện đại như sử dụng màng lọc, công nghệ sinh học và các phương pháp hóa học có thể giúp loại bỏ crôm khỏi nước thải trước khi thải ra môi trường [16]. Bên cạnh đó, việc nâng cao nhận thức cộng đồng về tác động của ô nhiễm crôm và khuyến khích các doanh nghiệp thực hiện các biện pháp bảo vệ môi trường cũng là rất cần thiết.

Bối cảnh tăng trưởng kinh tế nhanh tại Việt Nam, với tốc độ công nghiệp hóa và đô thị hóa ngày càng cao, đã tạo ra áp lực lớn lên môi trường, đặc biệt là tình trạng ô nhiễm Cr. Với vai trò là một trong những trung tâm kinh tế mới nổi ở khu vực Đông Nam Á, Việt Nam đối mặt với nguy cơ mất cân bằng nghiêm trọng giữa phát triển kinh tế và bảo vệ môi trường. Crôm, đặc biệt ở dạng Cr(VI) độc hại, không chỉ là mối đe dọa đến sức khỏe cộng đồng mà còn có tác động tiêu cực đến các ngành kinh tế trọng điểm như nông nghiệp, công nghiệp chế biến và du lịch. Nếu không có những hành động quyết liệt trong việc kiểm soát và xử lý ô nhiễm Cr, những thiệt hại tiềm tàng về sức khỏe và kinh tế có thể làm suy giảm đáng kể lợi ích của tăng trưởng kinh tế. Việc ưu tiên các giải pháp xử lý ô nhiễm Cr không chỉ giúp giảm thiểu tác động môi trường mà còn đảm bảo tính bền vững và hiệu quả lâu dài cho sự phát triển kinh tế của đất nước.

Mục tiêu của bài báo là đánh giá tổng quan về tình trạng ô nhiễm Cr trong nước thải từ hoạt động khai thác mỏ, làm rõ các tác động tiêu cực của nó đến môi trường và sức khỏe con người. Đồng thời, bài báo sẽ đề xuất các giải pháp hiệu quả nhằm xử lý và giảm thiểu ô nhiễm Cr, hướng đến bảo vệ môi trường và đảm bảo sự phát triển bền vững.

2. Phương pháp nghiên cứu

Phương pháp nghiên cứu chính trong bài báo này là tổng quan và đánh giá toàn diện về ô nhiễm Cr tại Việt Nam, với mục tiêu làm rõ các nguồn gốc gây ô nhiễm, ảnh hưởng của Cr đối với môi trường và sức khỏe con người, cũng như các phương pháp xử lý hiệu quả. Cụ thể, bài báo sử dụng phương pháp tổng hợp tài liệu kết hợp với phân tích các nguyên lý lý thuyết và thực tiễn liên quan đến ô nhiễm Cr trong nước và đất. Bài báo tập trung vào các yếu tố quan trọng như nguồn gốc tự nhiên và nhân tạo của Cr, sự tác động của Cr(VI) đến chất lượng đất, năng suất cây trồng, ngành du lịch và sức khỏe cộng đồng.

Ngoài ra, phương pháp nghiên cứu cũng bao gồm việc phân tích các biện pháp xử lý và giám sát ô nhiễm Cr, từ các giải pháp sinh học (như sử dụng vi sinh vật và thực vật hấp thụ Cr), các phương pháp hóa học (như khử Cr(VI) thành Cr(III)) đến các kỹ thuật vật lý và công nghệ tiên tiến. Bài báo cũng xem xét việc áp dụng các nguyên lý bảo vệ môi trường, như nguyên lý phòng ngừa ô nhiễm và sử dụng công nghệ bền vững, nhằm giảm thiểu tác động tiêu cực của ô nhiễm Cr, bảo vệ môi trường và đảm bảo sự phát triển kinh tế - xã hội bền vững trong dài hạn.

3. Kết quả nghiên cứu và thảo luận

3.1. Crôm trong nước thải khai thác khoáng sản

3.1.1. Nguồn gốc ô nhiễm crôm

Ô nhiễm Cr tại Việt Nam đang trở thành một vấn đề môi trường cần được quan tâm, chủ yếu do các hoạt động khai thác và chế biến khoáng sản, cũng như từ nhiều ngành công nghiệp khác. Quá trình khai thác khoáng sản, đặc biệt là tại các khu vực như Quảng Ninh, Thái Nguyên và Lào Cai, thường sử dụng các hợp chất hóa học chứa crôm, nên có thể dẫn đến sự phát thải crôm vào môi trường đất, nước và không khí nếu không có các biện pháp xử lý và quản lý phù hợp. Những khu vực này đã ghi nhận mức độ ô nhiễm crôm, có thể ảnh hưởng trực tiếp đến hệ sinh thái địa phương và sức khỏe cộng đồng.

Trong các ngành công nghiệp như xi mạ kim loại, sản xuất da thuộc và hóa chất, crôm, đặc biệt là dạng Cr(VI), được sử dụng phổ biến. Cr(VI) có tính độc hại cao, dễ hòa tan trong nước, làm tăng khả năng lan truyền trong môi trường và gây ra nhiều vấn đề sức khỏe nghiêm trọng, bao gồm ung thư và tổn hại đến hệ thần kinh [17]. Ngược lại, Cr(III) là dạng ít độc hơn, nhưng có thể chuyển hóa thành Cr(VI) dưới tác động của các yếu tố hóa học và sinh học [18]. Theo các nghiên cứu, nước thải từ một số nhà máy công nghiệp tại Việt Nam nếu chưa được xử lý hoặc xử lý chưa đạt tiêu chuẩn có thể chứa hàm lượng Cr(VI) cao hơn mức cho phép. Tại một số khu vực công nghiệp, tình trạng này có thể ảnh hưởng đến chất lượng nguồn nước mặt và nước ngầm, từ đó tác động đến nguồn nước sinh hoạt và sản xuất nông nghiệp [17], [18]. Việc quản lý và xử lý nước thải hiệu quả đóng vai trò quan trọng trong việc bảo vệ môi trường và đảm bảo sự phát triển bền vững. Vì vậy, việc kiểm soát ô nhiễm crôm và cải thiện quy trình xử lý nước thải là rất cần thiết để bảo vệ sức khỏe cộng đồng và môi trường. Các biện pháp như nâng cao nhận thức về ô nhiễm môi trường, cải thiện công nghệ xử lý nước thải và tăng cường quản lý nhà nước trong lĩnh vực này cần được thực hiện một cách đồng bộ.

3.1.2. Tính chất hóa học và độc tính của Crôm

Crôm là một kim loại chuyển tiếp có tính ứng dụng cao trong công nghiệp, nhưng đồng thời cũng mang tính độc hại nghiêm trọng, đặc biệt ở dạng Cr(VI) (Bảng 1). Crôm tồn tại ở nhiều trạng thái oxi hóa khác nhau, trong đó phổ biến nhất là Cr(0), Cr(III), và Cr(VI). Dạng Cr(0) là kim loại nguyên chất, cứng, có khả năng chống ăn mòn cao nhờ hình thành lớp oxit bền vững (Cr_2O_3) trên bề mặt, thường được sử dụng trong xi mạ và sản xuất hợp kim [19]. Cr(III) là dạng ổn định trong tự nhiên, đóng vai trò là nguyên tố vi lượng cần thiết cho cơ thể, tham gia vào quá trình chuyển hóa carbohydrate và lipid. Tuy nhiên, ở nồng độ cao, Cr(III) cũng có thể gây hại cho sức khỏe [20]. Trái lại, Cr(VI) là dạng oxi hóa mạnh, dễ tan trong nước, và có độc tính cực kỳ cao. Cr(VI) thường xuất hiện dưới dạng các hợp chất như natri bicromat ($\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$), kali cromat (K_2CrO_4), và axit cromic (H_2CrO_4), được sử dụng rộng rãi trong công nghiệp xi mạ, sản xuất da thuộc, và hóa chất [21].

Bảng 1. Các dạng Crôm (Cr), đặc điểm và tác động

Dạng Crôm (Cr)	Đặc điểm	Tác động
Cr(0)	Kim loại nguyên chất, cứng, chống ăn mòn cao nhờ lớp oxit bền vững (Cr_2O_3). Sử dụng trong xi mạ và sản xuất hợp kim.	Không độc hại ở dạng nguyên chất. Chủ yếu mang tính ứng dụng công nghiệp.
Cr(III)	Dạng ổn định trong tự nhiên, cần thiết như nguyên tố vi lượng cho cơ thể (chuyển hóa carbohydrate và lipid). Gây hại ở nồng độ cao.	Cần thiết ở mức vi lượng nhưng gây độc ở nồng độ cao, ảnh hưởng sức khỏe.
Cr(VI)	Dạng oxi hóa mạnh, dễ tan trong nước, độc tính rất cao. Sử dụng trong xi mạ, da thuộc, hóa chất.	Độc tính cực kỳ cao, gây ung thư, đột biến gen, tổn thương cơ quan nội tạng. Ô nhiễm nước, đất, không khí nghiêm trọng.

Cr(VI) có độc tính vượt trội so với Cr(III), gây nguy hiểm nghiêm trọng đến sức khỏe con người và môi trường. Khi xâm nhập vào cơ thể qua đường hô hấp, tiêu hóa hoặc tiếp xúc qua da, Cr(VI) có thể gây tổn thương phổi, gan, thận, và hệ tiêu hóa [22]. Đây là chất gây ung thư nhóm 1 theo cơ quan nghiên cứu ung thư quốc tế, đặc biệt liên quan đến ung thư phổi, đồng thời có khả năng gây đột biến gen và dị tật bẩm sinh [23]. Trong môi trường, Cr(VI) dễ tan trong nước và lan truyền nhanh, gây ô nhiễm nguồn nước ngầm và nước mặt. Ở mức trên 0,05 mg/L, nước nhiễm Cr(VI) đã vượt tiêu chuẩn an toàn và đe dọa sức khỏe cộng đồng [24]. Ngoài ra, Cr(VI) trong đất làm giảm độ phì nhiêu, ảnh hưởng đến năng suất cây trồng, trong khi bụi chứa Cr(VI) từ các khu công nghiệp có thể gây ô nhiễm không khí nghiêm trọng [25].

3.1.3. Quy mô và mức độ ô nhiễm

Ô nhiễm crôm, đặc biệt là Cr(VI), đã trở thành một vấn đề môi trường nghiêm trọng trên toàn cầu, với những nguồn phát thải chủ yếu từ các ngành công nghiệp như khai thác khoáng sản, xi

mạ kim loại, sản xuất hóa chất và thuộc da. Cr(VI) được xác định là một trong những chất gây ung thư nguy hiểm nhất, có khả năng ảnh hưởng đến sức khỏe của hàng triệu người trên thế giới [17]. Tình trạng ô nhiễm Cr(VI) đã được ghi nhận đặc biệt nghiêm trọng tại các quốc gia như Ấn Độ và Trung Quốc, nơi mà nồng độ Cr(VI) trong nước thải công nghiệp thường vượt quá tiêu chuẩn an toàn, dẫn đến những tác động tiêu cực đến sức khỏe cộng đồng và môi trường [26].

Tại Việt Nam, ô nhiễm crôm chủ yếu phát sinh từ nước thải chưa qua xử lý hoặc xử lý không đạt tiêu chuẩn từ các ngành công nghiệp như xi mạ kim loại, thuộc da và sản xuất hóa chất (Bảng 2). Các khu vực công nghiệp mạnh như Đồng Nai, Bình Dương và Thành phố Hồ Chí Minh là những vùng có nguy cơ về ô nhiễm Cr(VI), với nồng độ Cr(VI) trong nước thải chưa xử lý đôi khi vượt quá tiêu chuẩn cho phép từ 5-10 lần [27]. Tình trạng này không chỉ ảnh hưởng đến chất lượng nguồn nước mặt và nước ngầm mà còn tác động gián tiếp đến sản xuất nông nghiệp và sinh hoạt của người dân trong khu vực [28]. Việc ô nhiễm này có thể dẫn đến những nguy cơ sức khỏe nghiêm trọng cho cộng đồng, đặc biệt là ở những khu vực gần các khu công nghiệp [29].

Mặc dù tình trạng ô nhiễm crôm đang là một thách thức lớn, Việt Nam đã có những bước tiến trong việc quản lý nguồn nước thải công nghiệp. Các quy định nghiêm ngặt hơn về xử lý nước thải đã được áp dụng, cùng với việc khuyến khích doanh nghiệp sử dụng công nghệ xử lý tiên tiến [30]. Để kiểm soát hiệu quả ô nhiễm crôm, cần tiếp tục đầu tư vào công nghệ xử lý nước thải, nâng cao nhận thức cộng đồng về tác hại của ô nhiễm và khuyến khích sự tham gia của doanh nghiệp trong bảo vệ môi trường. Những nỗ lực này là cần thiết để đảm bảo sự phát triển bền vững và bảo vệ sức khỏe cộng đồng tại Việt Nam.

Bảng 2. Nguồn phát thải Crôm (Cr) và tác động tại Việt Nam

Nguồn phát thải	Tác động	Khu vực ảnh hưởng tại Việt Nam
Khai thác khoáng sản	Phát sinh nước thải chứa Cr(VI), gây ô nhiễm nguồn nước và đất.	Các vùng khai khoáng lớn
Xi mạ kim loại	Thải Cr(VI) vào môi trường, ảnh hưởng nghiêm trọng đến sức khỏe cộng đồng.	Đồng Nai, Bình Dương, Thành phố Hồ Chí Minh
Sản xuất hóa chất	Gây ô nhiễm nước thải với nồng độ Cr(VI) vượt mức an toàn, tác động đến chất lượng nước mặt và nước ngầm.	Các khu công nghiệp sản xuất hóa chất
Thuộc da	Xả thải chưa qua xử lý, gây ô nhiễm nặng tại các khu vực công nghiệp.	Các cơ sở thuộc da tại các tỉnh công nghiệp

3.2. Tác động của ô nhiễm Cr đến môi trường và sức khỏe con người

3.2.1. Tác động môi trường

Ô nhiễm crôm, đặc biệt là dạng Cr(VI), đã trở thành một vấn đề nghiêm trọng đối với chất lượng nguồn nước mặt và nước ngầm, gây ra những tác động sâu rộng đến môi trường và sức khỏe con người. Cr(VI) có tính hòa tan cao, cho phép nó dễ dàng xâm nhập vào các hệ thống sông, hồ và thấm sâu vào tầng nước ngầm thông qua nước thải công nghiệp chưa qua xử lý hoặc xử lý không đạt tiêu chuẩn [31]. Tại các khu vực công nghiệp lớn, nồng độ Cr(VI) trong nước thải thường vượt mức cho phép, dẫn đến suy giảm chất lượng nguồn nước mặt và đe dọa đến hệ sinh thái thủy sinh [32]. Hơn nữa, ô nhiễm này không chỉ giới hạn ở việc làm giảm chất lượng nước mà còn ảnh hưởng đến sức khỏe cộng đồng, đặc biệt là nguy cơ tích tụ các chất độc hại trong chuỗi thức ăn [33].

Hệ thống nước ngầm, vốn là nguồn cung cấp nước sinh hoạt và sản xuất quan trọng, cũng bị ảnh hưởng nghiêm trọng bởi ô nhiễm Cr(VI). Nghiên cứu cho thấy rằng việc xả thải nước chưa qua xử lý từ các ngành công nghiệp như khai thác khoáng sản và sản xuất hóa chất có thể làm ô nhiễm nguồn nước ngầm, dẫn đến những hệ lụy lâu dài cho sức khỏe con người và môi trường [31]. Đặc biệt, trong bối cảnh biến đổi khí hậu và gia tăng nhu cầu nước sạch, việc kiểm soát ô nhiễm Cr(VI) trở nên cấp bách hơn bao giờ hết [34].

Ô nhiễm crôm, đặc biệt là dạng Cr(VI), đang gây ra những tác động nghiêm trọng đối với hệ sinh thái thủy sinh, làm suy giảm đa dạng sinh học và ảnh hưởng đến cân bằng môi trường nước. Cr(VI) có độc tính cao và dễ dàng hòa tan trong nước, cho phép nó xâm nhập vào cơ thể các loài thủy sinh như cá, nhuyễn thể và tảo, gây tổn thương đến các cơ quan và làm rối loạn các quá trình sinh hóa trong cơ thể chúng [35]. Nghiên cứu cho thấy rằng chỉ với nồng độ Cr(VI) thấp như 0,1 mg/L, đã đủ để gây ảnh hưởng tiêu cực đến sức khỏe của các loài thủy sinh, làm giảm khả năng sinh sản, tăng tỷ lệ tử vong và thậm chí có thể dẫn đến tuyệt chủng cục bộ đối với một số loài nhạy cảm [36].

Sự tích lũy crôm trong sinh vật thủy sinh không chỉ ảnh hưởng đến các loài cấp thấp mà còn có thể truyền qua chuỗi thức ăn, tác động đến các loài cấp cao hơn, bao gồm cả con người khi tiêu thụ thủy sản từ những vùng nước bị ô nhiễm [37]. Điều này không chỉ làm suy giảm đa dạng sinh học mà còn ảnh hưởng đến ngành nuôi trồng và khai thác thủy sản, gây thiệt hại về kinh tế và môi trường [31]. Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng ô nhiễm kim loại nặng, trong đó có Cr(VI), đã làm giảm chất lượng nước và ảnh hưởng đến sự phát triển của các loài thủy sinh, dẫn đến sự thay đổi trong cấu trúc quần xã sinh vật và giảm khả năng phục hồi của hệ sinh thái [38].

3.2.2. Ảnh hưởng đến sức khỏe con người

Ô nhiễm crôm, đặc biệt là hợp chất crôm hóa trị 6 (Cr(VI)), đã trở thành một vấn đề nghiêm trọng đối với sức khỏe con người và hệ sinh thái. Cr(VI) được biết đến như một kim loại nặng độc hại, có khả năng xâm nhập vào cơ thể qua nhiều con đường như nước uống, thực phẩm, không khí hoặc tiếp xúc trực tiếp. Hệ quả của việc tiếp xúc với Cr(VI) rất nghiêm trọng, trong đó có nguy cơ mắc bệnh ung thư. Theo Tổ chức Y tế Thế giới (WHO), Cr(VI) được phân loại là chất gây ung thư loại 1, đặc biệt liên quan đến ung thư phổi, ung thư mũi và ung thư xoang khi tiếp xúc qua đường hô hấp [39]. Nghiên cứu cho thấy rằng những công nhân trong ngành công nghiệp mạ điện hoặc sản xuất xi măng có tỷ lệ mắc ung thư phổi cao hơn so với dân số thông thường.

Ngoài tác động gây ung thư, Cr(VI) còn ảnh hưởng nghiêm trọng đến chức năng gan và thận, hai cơ quan chủ yếu trong việc lọc và thải độc tố. Nghiên cứu cho thấy rằng mức độ Cr(VI) trong nước vượt quá tiêu chuẩn 0,05 mg/L theo WHO có thể dẫn đến tăng men gan, giảm chức năng lọc của thận và thậm chí gây suy gan, suy thận mãn tính [40]. Các nghiên cứu khác cũng chỉ ra rằng Cr(VI) gây ra tổn thương tế bào và làm tăng mức độ stress oxy hóa trong gan và thận, dẫn đến các vấn đề sức khỏe nghiêm trọng [39], [40].

Tác động của Cr(VI) không chỉ dừng lại ở việc gây hại cho cơ thể người mà còn ảnh hưởng đến chuỗi thức ăn thông qua hiện tượng tích tụ sinh học. Khi Cr(VI) xâm nhập vào môi trường nước, nó có thể tích lũy trong các sinh vật như cá, tảo và động vật thủy sinh, sau đó lan truyền qua chuỗi thức ăn. Con người, khi tiêu thụ thực phẩm từ những nguồn này, có nguy cơ nhiễm Cr ở nồng độ cao, dẫn đến các rối loạn chuyển hóa và tăng nguy cơ mắc bệnh mãn tính [43]. Một nghiên cứu tại Trung Quốc đã phát hiện hàm lượng Cr trong cá ở các sông bị ô nhiễm cao gấp 10 lần mức an toàn cho phép, gây ảnh hưởng lớn đến cộng đồng dân cư sống dựa vào nguồn thủy sản này.

3.3. Công nghệ xử lý nước thải ô nhiễm crôm

3.3.1. Các phương pháp xử lý hiện nay

Các phương pháp xử lý Cr phổ biến hiện nay được trình bày tại Bảng 3. Trong cùng một hệ thống xử lý có thể có nhiều phương pháp được áp dụng. Kết quả ở Bảng 3 cho thấy nguyên lý hoạt động, hiệu suất xử lý và ưu nhược điểm của từng phương pháp. Cụ thể được đánh giá như sau:

* *Kết tủa hóa học*: là một trong những phương pháp phổ biến và hiệu quả trong việc xử lý nước thải ô nhiễm crôm, đặc biệt là crôm hóa trị sáu (Cr(VI)). Phương pháp này hoạt động dựa trên nguyên lý chuyển đổi các ion Cr(VI) thành dạng không tan, từ đó dễ dàng tách ra khỏi nước thải. Cụ thể, các chất phản ứng như hydroxide kim loại (ví dụ: NaOH, Ca(OH)₂) hoặc sulfide (Na₂S) được thêm vào nước thải, dẫn đến sự hình thành các hợp chất không tan như Cr(OH)₃ hoặc các muối khác. Quá trình này diễn ra qua các bước: đầu tiên, chất phản ứng được thêm vào,

sau đó tạo ra kết tủa và cuối cùng là tách kết tủa ra khỏi nước thải thông qua lắng và lọc [40]. Hiệu suất loại bỏ Cr(VI) của phương pháp kết tủa hóa học có thể đạt trên 95%, đặc biệt khi điều kiện pH được kiểm soát chặt chẽ trong khoảng 8-9 [42]. Việc duy trì pH trong khoảng này là rất quan trọng vì nó ảnh hưởng đến sự hình thành và ổn định của kết tủa Cr(OH)₃. Nếu pH quá thấp, Cr(VI) có thể không được chuyển đổi hoàn toàn thành dạng không tan, dẫn đến hiệu suất loại bỏ thấp hơn [41]. Mặc dù kết tủa hóa học có nhiều ưu điểm như chi phí thấp và khả năng triển khai dễ dàng trên quy mô lớn, phương pháp này cũng tạo ra lượng bùn thải đáng kể cần được xử lý tiếp theo. Bùn thải này có thể gây ô nhiễm nếu không được quản lý đúng cách. Do đó, việc áp dụng phương pháp này cần phải cân nhắc kỹ lưỡng giữa hiệu quả xử lý và quản lý bùn thải [43].

Bảng 3. Tổng quan các phương pháp xử lý nước thải ô nhiễm Crôm (Cr)

Phương pháp xử lý	Nguyên lý hoạt động	Hiệu quả xử lý	Ưu điểm và hạn chế
Kết tủa hóa học	Chuyển Cr(VI) thành dạng không tan (Cr(OH) ₃) thông qua phản ứng với NaOH, Ca(OH) ₂ hoặc Na ₂ S.	Loại bỏ trên 95% Cr(VI) khi pH được kiểm soát trong khoảng 8-9.	Ưu điểm: Chi phí thấp, dễ triển khai; Hạn chế: Tạo ra bùn thải cần xử lý thêm.
Hấp phụ	Sử dụng vật liệu hấp phụ (than hoạt tính, graphene oxide, vỏ trấu) để hút và giữ Cr trên bề mặt.	Hấp phụ tới 98% Cr(VI) với vật liệu phù hợp (ví dụ: than hoạt tính từ vỏ trấu).	Ưu điểm: Chi phí thấp, sử dụng vật liệu tự nhiên; Hạn chế: Vật liệu cần tái tạo sau khi bão hòa.
Công nghệ màng	Loại bỏ Cr bằng cơ chế lọc sử dụng màng lọc nano (NF) và thẩm thấu ngược (RO).	Đạt hiệu quả tới 99%, loại bỏ gần như hoàn toàn các ion Cr.	Ưu điểm: Hiệu suất cao; Hạn chế: Chi phí đầu tư và vận hành cao.
Oxy hóa khử	Chuyển đổi Cr(VI) thành Cr(III) ít độc hơn bằng các chất oxy hóa như H ₂ O ₂ hoặc FeSO ₄ .	Giảm Cr(VI) xuống dưới 0,05 mg/L, đáp ứng tiêu chuẩn nước thải công nghiệp.	Ưu điểm: Linh hoạt, kết hợp dễ dàng với phương pháp khác; Hạn chế: Có thể tạo sản phẩm phụ cần xử lý.

* *Hấp phụ bằng vật liệu tự nhiên hoặc tổng hợp*: Hấp phụ là một phương pháp xử lý nước thải hiệu quả, dựa trên việc sử dụng các vật liệu có khả năng hút và giữ crôm (Cr) trên bề mặt của chúng. Các vật liệu này có thể là tự nhiên như than hoạt tính, zeolite, và các phế phẩm nông nghiệp như vỏ trấu và xơ dừa, hoặc các vật liệu tổng hợp như polymer chức năng hóa và graphene oxide. Phương pháp hấp phụ đã được chứng minh là hiệu quả trong việc loại bỏ cả Cr(VI) và Cr(III), ngay cả khi nồng độ crôm trong nước thải ở mức thấp [44]. Một nghiên cứu thực nghiệm cho thấy than hoạt tính từ vỏ trấu có khả năng hấp phụ tới 98% Cr(VI) từ nước thải với nồng độ ban đầu 50 mg/L [45]. Điều này cho thấy khả năng hấp phụ cao của vật liệu tự nhiên, đồng thời cũng chỉ ra rằng các vật liệu nông nghiệp có thể được sử dụng như một giải pháp bền vững và thân thiện với môi trường trong xử lý nước thải.

Bên cạnh đó, graphene oxide cũng đã được nghiên cứu và chứng minh là có khả năng hấp phụ tốt đối với các ion kim loại nặng, bao gồm cả crôm. Các nghiên cứu cho thấy graphene oxide có nhiều nhóm chức năng như hydroxyl, epoxy và carboxyl, giúp tăng cường khả năng hấp phụ [46]. Mặc dù phương pháp hấp phụ có nhiều ưu điểm như chi phí thấp và khả năng triển khai dễ dàng, nhưng nhược điểm lớn của nó là vật liệu hấp phụ cần được tái tạo hoặc xử lý sau khi bão hòa. Việc này có thể tạo ra thêm chi phí và công sức cho quá trình xử lý. Tóm lại, hấp phụ là một phương pháp hứa hẹn trong việc xử lý nước thải ô nhiễm crôm, với nhiều loại vật liệu hấp phụ khác nhau có thể được sử dụng, mặc dù cần chú ý đến vấn đề tái tạo vật liệu sau khi sử dụng.

* *Công nghệ màng và oxy hóa khử*: Công nghệ màng, bao gồm màng lọc nano (NF) và thẩm thấu ngược (RO), đã trở thành một giải pháp tiên tiến trong việc xử lý nước thải ô nhiễm crôm. Các màng này có khả năng loại bỏ hầu hết các ion kim loại nặng, bao gồm crôm, nhờ vào kích thước lỗ siêu nhỏ và cơ chế lọc chọn lọc. Hiệu quả xử lý crôm bằng công nghệ màng có thể đạt tới 99%, tuy nhiên, chi phí đầu tư và vận hành của phương pháp này khá cao, khiến nó phù hợp hơn với các khu công nghiệp lớn hoặc những nơi yêu cầu tiêu chuẩn xử lý nghiêm ngặt [47].

Ngoài công nghệ màng, phương pháp oxy hóa khử cũng được sử dụng để chuyển đổi Cr(VI) (dạng độc hại) thành Cr(III) (ít độc hơn và dễ kết tủa). Các chất oxy hóa như hydro peroxide (H_2O_2) hoặc muối sắt ($FeSO_4$) thường được thêm vào để thực hiện phản ứng này. Quá trình oxy hóa khử thường được kết hợp với phương pháp kết tủa để đạt hiệu quả tối ưu. Một ứng dụng thực tế cho thấy việc sử dụng $FeSO_4$ với liều lượng hợp lý có thể giảm nồng độ Cr(VI) xuống dưới 0,05 mg/L, đáp ứng tiêu chuẩn nước thải công nghiệp [48].

Mặc dù cả hai phương pháp đều có hiệu quả cao trong việc xử lý nước thải ô nhiễm crôm, nhưng chúng cũng có những nhược điểm riêng. Công nghệ màng đòi hỏi chi phí đầu tư ban đầu lớn và cần bảo trì thường xuyên, trong khi phương pháp oxy hóa khử có thể tạo ra các sản phẩm phụ cần được xử lý thêm. Do đó, việc lựa chọn phương pháp xử lý phù hợp cần được cân nhắc kỹ lưỡng dựa trên điều kiện cụ thể của từng khu vực và yêu cầu về tiêu chuẩn xử lý.

* *Công nghệ màng và oxy hóa khử*: Công nghệ màng, bao gồm màng lọc nano (NF) và thẩm thấu ngược (RO), đã trở thành một giải pháp tiên tiến trong việc xử lý nước thải ô nhiễm crôm. Các màng này có khả năng loại bỏ hầu hết các ion kim loại nặng, bao gồm crôm, nhờ vào kích thước lỗ siêu nhỏ và cơ chế lọc chọn lọc. Hiệu quả xử lý crôm bằng công nghệ màng có thể đạt tới 99%, cho phép loại bỏ gần như hoàn toàn các ion Cr(VI) và Cr(III) ra khỏi nước thải [40]. Tuy nhiên, chi phí đầu tư và vận hành của phương pháp này khá cao, khiến nó phù hợp hơn với các khu công nghiệp lớn hoặc những nơi yêu cầu tiêu chuẩn xử lý nghiêm ngặt [42].

Bên cạnh công nghệ màng, phương pháp oxy hóa khử cũng được sử dụng để chuyển đổi Cr(VI) (dạng độc hại) thành Cr(III) (ít độc hơn và dễ kết tủa). Các chất oxy hóa như hydro peroxide (H_2O_2) hoặc muối sắt ($FeSO_4$) thường được thêm vào để thực hiện phản ứng này. Quá trình oxy hóa khử thường được kết hợp với phương pháp kết tủa để đạt hiệu quả tối ưu. Một ứng dụng thực tế cho thấy việc sử dụng $FeSO_4$ với liều lượng hợp lý có thể giảm nồng độ Cr(VI) xuống dưới 0,05 mg/L, đáp ứng tiêu chuẩn nước thải công nghiệp [39] - [41]. Việc chuyển đổi này không chỉ làm giảm độc tính của crôm mà còn tạo điều kiện thuận lợi cho việc loại bỏ crôm thông qua các phương pháp kết tủa sau đó. Như vậy, công nghệ màng và phương pháp oxy hóa khử đều là những giải pháp hiệu quả trong việc xử lý nước thải ô nhiễm crôm. Mặc dù công nghệ màng có hiệu suất cao, chi phí đầu tư và vận hành vẫn là một yếu tố cần cân nhắc. Trong khi đó, phương pháp oxy hóa khử có thể được áp dụng linh hoạt hơn và kết hợp với các phương pháp khác để tối ưu hóa hiệu quả xử lý.

Mỗi công nghệ xử lý nước thải ô nhiễm crôm đều có những ưu điểm và hạn chế riêng, từ chi phí, hiệu suất xử lý đến yêu cầu vận hành. Việc lựa chọn phương pháp phù hợp phụ thuộc vào mức độ ô nhiễm, điều kiện vận hành và yêu cầu môi trường cụ thể. Để đạt hiệu quả cao, các phương pháp này có thể được kết hợp thành một hệ thống xử lý toàn diện.

3.3.2. Thách thức trong xử lý ô nhiễm crôm

* *Chi phí cao và hiệu quả xử lý Cr(VI) còn hạn chế*: Ô nhiễm crôm, đặc biệt là crôm hóa trị sáu (Cr(VI)), đã trở thành một trong những vấn đề môi trường nghiêm trọng, đòi hỏi các giải pháp xử lý hiệu quả và bền vững. Tuy nhiên, một trong những thách thức lớn nhất trong việc xử lý ô nhiễm Cr(VI) là chi phí cao và hiệu quả xử lý chưa đạt mức tối ưu. Các phương pháp xử lý hiện nay, như kết tủa hóa học, hấp phụ, hoặc công nghệ màng, thường yêu cầu đầu tư lớn vào thiết bị, hóa chất và vận hành [39], [40]. Việc giảm nồng độ Cr(VI) xuống mức đạt tiêu chuẩn môi trường (dưới 0,05 mg/L) thường gặp khó khăn, do Cr(VI) có tính độc cao và tồn tại ổn định trong môi trường. Các phương pháp như kết tủa hóa học có thể đạt hiệu suất loại bỏ cao, nhưng vẫn cần một lượng hóa chất đáng kể và quy trình xử lý phức tạp [42]. Hơn nữa, phương pháp hấp phụ, mặc dù có thể sử dụng các vật liệu tự nhiên và phế phẩm nông nghiệp, nhưng cũng đòi hỏi chi phí cho việc tái tạo hoặc xử lý vật liệu hấp phụ sau khi bão hòa [41]. Công nghệ màng, bao gồm màng lọc nano (NF) và thẩm thấu ngược (RO), đã được chứng minh là có hiệu quả cao trong việc loại bỏ Cr(VI), với khả năng đạt tới 99%. Tuy nhiên, chi phí vận hành của các công nghệ này rất cao, đặc biệt là tiêu thụ năng

lượng và yêu cầu bảo trì định kỳ [44]. Điều này tạo ra gánh nặng lớn cho các doanh nghiệp nhỏ hoặc khu vực có ngân sách hạn chế, khiến cho việc áp dụng các công nghệ tiên tiến này trở nên khó khăn.

* *Thách thức trong xử lý nước thải ô nhiễm crôm tại quy mô lớn:* Việc xử lý nước thải ô nhiễm crôm, đặc biệt là crôm hóa trị sáu (Cr(VI)), tại các khu công nghiệp và đô thị lớn đang đặt ra nhiều thách thức nghiêm trọng. Một trong những vấn đề chính là khối lượng nước thải chứa crôm phát sinh hàng ngày rất lớn, đòi hỏi các hệ thống xử lý phải hoạt động ổn định trong điều kiện lưu lượng thay đổi liên tục và mức độ ô nhiễm đa dạng [49]. Điều này không chỉ yêu cầu công nghệ xử lý tiên tiến mà còn cần một hệ thống quản lý hiệu quả để đảm bảo rằng các tiêu chuẩn môi trường được đáp ứng. Ngoài ra, việc xử lý khối lượng lớn bùn thải chứa crôm phát sinh từ các quá trình như kết tủa hóa học hoặc hấp phụ cũng là một thách thức lớn. Bùn thải này cần được xử lý và tiêu hủy một cách hiệu quả để tránh tái ô nhiễm môi trường. Việc xử lý bùn thải không chỉ tốn kém mà còn phức tạp, đặc biệt trong việc đảm bảo rằng các chất độc hại không được thải ra môi trường [50]. Đặc biệt ở các quốc gia đang phát triển, thiếu hụt cơ sở hạ tầng và nhân lực kỹ thuật có thể khiến các giải pháp công nghệ tiên tiến không được áp dụng hiệu quả. Điều này dẫn đến việc các hệ thống xử lý không đáp ứng được nhu cầu thực tế, gây ra những hậu quả nghiêm trọng cho môi trường và sức khỏe cộng đồng. Việc đầu tư vào đào tạo nhân lực và nâng cấp cơ sở hạ tầng là rất cần thiết để cải thiện khả năng xử lý nước thải ô nhiễm crôm.

3.4. Đề xuất và giải pháp xử lý và quản lý ô nhiễm Cr trong nước thải

3.4.1. Giải pháp kỹ thuật

(1) Phát triển công nghệ mới, thân thiện với môi trường: Một trong những giải pháp quan trọng trong việc xử lý ô nhiễm crôm là phát triển các công nghệ mới, thân thiện với môi trường. Các công nghệ này không chỉ giúp loại bỏ crôm hiệu quả mà còn giảm thiểu tác động tiêu cực đến môi trường. Ví dụ, việc áp dụng công nghệ vi tảo để xử lý nước thải đã cho thấy khả năng loại bỏ các chất ô nhiễm, bao gồm cả crôm, đồng thời tạo ra giá trị kinh tế từ việc thu hồi các sản phẩm hữu ích từ quá trình xử lý. Ngoài ra, các hệ thống xử lý nước thải tự nhiên, như hệ thống đất ngập nước nhân tạo, cũng đã được nghiên cứu và chứng minh là hiệu quả trong việc xử lý nước thải mà không cần sử dụng hóa chất độc hại.

(2) Sử dụng vật liệu tái chế trong xử lý: Việc sử dụng vật liệu tái chế trong xử lý nước thải ô nhiễm crôm không chỉ giúp giảm chi phí mà còn góp phần bảo vệ môi trường. Các vật liệu như bã thực vật, vỏ trấu, và các phế phẩm nông nghiệp có thể được sử dụng làm vật liệu hấp phụ để loại bỏ crôm từ nước thải. Nghiên cứu cho thấy rằng các vật liệu này có khả năng hấp phụ cao đối với các ion crôm, đồng thời giúp giảm thiểu lượng chất thải rắn phát sinh từ quá trình xử lý. Việc tái chế các vật liệu này không chỉ mang lại lợi ích kinh tế mà còn giúp giảm thiểu ô nhiễm môi trường.

(3) Kết hợp các phương pháp xử lý: Một giải pháp khác là kết hợp các phương pháp xử lý khác nhau để tối ưu hóa hiệu quả loại bỏ crôm. Ví dụ, kết hợp giữa phương pháp oxy hóa khử và kết tủa hóa học có thể giúp chuyển đổi Cr(VI) thành Cr(III) và sau đó loại bỏ nó thông qua kết tủa. Nghiên cứu đã chỉ ra rằng việc sử dụng các chất oxy hóa như H_2O_2 hoặc muối sắt ($FeSO_4$) có thể giảm nồng độ Cr(VI) xuống dưới mức quy định. Việc kết hợp này không chỉ tăng cường hiệu quả xử lý mà còn giúp tiết kiệm chi phí và thời gian.

3.4.2. Giải pháp quản lý và chính sách

Để giải quyết hiệu quả vấn đề ô nhiễm Cr, cần có những giải pháp quản lý và chính sách đồng bộ, kết hợp giữa giám sát chặt chẽ và đầu tư nghiên cứu dài hạn. Trước tiên, việc tăng cường giám sát và xử phạt các hành vi gây ô nhiễm là vô cùng quan trọng. Các cơ quan quản lý cần áp dụng công nghệ hiện đại để theo dõi mức độ Cr trong nước thải tại các khu công nghiệp và đô thị. Đồng thời, quy định các mức phạt nghiêm khắc đối với những doanh nghiệp xả thải vượt ngưỡng cho phép hoặc không tuân thủ quy trình xử lý. Một hệ thống kiểm tra định kỳ và công khai các số

liệu giám sát môi trường sẽ tạo sức ép buộc các cơ sở sản xuất phải tuân thủ quy định, từ đó giảm đáng kể nguồn ô nhiễm.

Song song với các biện pháp quản lý, việc đẩy mạnh nghiên cứu và hợp tác quốc tế là yếu tố then chốt trong việc phát triển các công nghệ xử lý Cr hiệu quả và bền vững. Các quốc gia cần hợp tác để chia sẻ kiến thức, công nghệ tiên tiến và kinh nghiệm quản lý ô nhiễm Cr, đồng thời tìm kiếm nguồn tài trợ từ các tổ chức quốc tế cho các dự án nghiên cứu. Việc xây dựng các trung tâm nghiên cứu liên ngành và các chương trình trao đổi chuyên gia sẽ giúp đẩy nhanh quá trình tìm kiếm các giải pháp xử lý mới, thân thiện với môi trường và tiết kiệm chi phí. Với cách tiếp cận tổng thể này, ô nhiễm Cr có thể được kiểm soát hiệu quả, góp phần bảo vệ sức khỏe cộng đồng và môi trường sống.

Trong bối cảnh thực tiễn tại Việt Nam, với những hạn chế về tài chính và hạ tầng, việc triển khai các giải pháp xử lý ô nhiễm Cr đòi hỏi một cách tiếp cận cân bằng giữa hiệu quả kỹ thuật, chi phí và tính khả thi trong điều kiện địa phương. Các giải pháp kỹ thuật như phát triển công nghệ mới và sử dụng vật liệu tái chế tuy hứa hẹn về mặt hiệu suất, nhưng cần được điều chỉnh để phù hợp với khả năng đầu tư và quy mô của các cơ sở sản xuất nhỏ lẻ tại Việt Nam. Ví dụ, việc ứng dụng công nghệ vi tảo hay hệ thống đất ngập nước nhân tạo có tiềm năng cao, nhưng để triển khai hiệu quả trên diện rộng, cần đầu tư ban đầu lớn cũng như thời gian dài để tối ưu hóa vận hành. Do đó, các công nghệ này có thể được áp dụng trước tiên tại các khu công nghiệp lớn, nơi có đủ nguồn lực để xây dựng và bảo trì hệ thống.

Việc sử dụng vật liệu tái chế như vỏ trấu hay các phế phẩm nông nghiệp mang lại lợi ích rõ rệt trong giảm chi phí, nhưng hiệu quả lâu dài phụ thuộc vào sự ổn định nguồn cung và khả năng tái chế vật liệu sau xử lý. Đây là điểm cần được quan tâm, đặc biệt tại các vùng nông thôn hoặc khu vực thiếu các cơ sở hỗ trợ kỹ thuật. Bên cạnh đó, việc kết hợp các phương pháp xử lý, như oxy hóa khử và kết tủa hóa học, tuy đạt hiệu suất cao, nhưng cần đảm bảo việc quản lý bùn thải phát sinh, tránh gây thêm áp lực lên môi trường.

Về mặt quản lý và chính sách, một trong những thách thức lớn là hệ thống giám sát và cưỡng chế thực thi còn yếu ở nhiều địa phương. Các biện pháp như áp dụng công nghệ hiện đại để theo dõi ô nhiễm, công khai kết quả giám sát, và tăng mức phạt đối với hành vi vi phạm cần được triển khai quyết liệt hơn. Tuy nhiên, để tăng tính khả thi, các chính sách cần đi kèm với hỗ trợ tài chính hoặc ưu đãi về thuế cho doanh nghiệp đầu tư vào công nghệ xử lý nước thải. Đồng thời, việc hợp tác quốc tế để tiếp cận nguồn vốn tài trợ và học hỏi công nghệ tiên tiến cũng là giải pháp quan trọng nhằm khắc phục hạn chế tài chính.

Việc áp dụng các giải pháp xử lý ô nhiễm Cr mang lại tác động dài hạn tích cực cả về kinh tế lẫn môi trường. Về kinh tế, các công nghệ xử lý hiện đại giúp doanh nghiệp giảm chi phí xử phạt, nâng cao uy tín, đồng thời thúc đẩy nền kinh tế tuần hoàn thông qua tái chế vật liệu và tạo giá trị gia tăng như sử dụng vi tảo. Điều này không chỉ hỗ trợ phát triển ngành công nghiệp xanh mà còn góp phần cải thiện nguồn thu, đặc biệt tại các khu vực nông nghiệp. Về môi trường, giảm thiểu Cr(VI) trong nước thải giúp bảo vệ nguồn nước, đất đai, và hệ sinh thái, đồng thời giảm các nguy cơ sức khỏe cộng đồng như ung thư hay tổn thương cơ quan nội tạng. Tuy nhiên, thách thức tài chính và quản lý bùn thải đòi hỏi các giải pháp phải được điều chỉnh phù hợp với điều kiện địa phương. Bên cạnh đó, việc tận dụng tài trợ quốc tế và phát triển công nghệ bền vững sẽ tạo cơ hội để Việt Nam vừa kiểm soát ô nhiễm hiệu quả, vừa đáp ứng các cam kết môi trường toàn cầu, đảm bảo phát triển bền vững trong tương lai.

4. Kết luận

Ô nhiễm crôm, đặc biệt là Cr(VI), là một thách thức môi trường và sức khỏe nghiêm trọng, chủ yếu phát sinh từ các ngành công nghiệp như khai thác khoáng sản, xi mạ kim loại, và sản xuất hóa chất. Tại Việt Nam, hàm lượng Cr(VI) trong nước thải công nghiệp ở một số khu vực vượt tiêu chuẩn cho phép từ 5-10 lần, gây ảnh hưởng nghiêm trọng đến chất lượng nước, sức khỏe cộng đồng và hệ sinh thái. Cr(VI) với độc tính cao, có thể gây ung thư và tổn thương gan,

thận, đòi hỏi các công nghệ xử lý tiên tiến như kết tủa hóa học (hiệu suất >95%), hấp phụ bằng vật liệu tái chế (loại bỏ tới 98%), và công nghệ màng (hiệu suất 99%). Để kiểm soát hiệu quả ô nhiễm Cr, cần áp dụng chính sách quản lý chặt chẽ, tăng cường giám sát và hợp tác quốc tế trong nghiên cứu các giải pháp bền vững.

Để tăng cường hiệu quả xử lý ô nhiễm Cr, cần tập trung vào một số nghiên cứu để cải thiện hiệu quả. Trước tiên, việc phát triển và ứng dụng các công nghệ xử lý thân thiện với môi trường, như sử dụng vi tảo hoặc hệ thống đất ngập nước nhân tạo, nên được ưu tiên, đặc biệt tại các khu vực có nguồn tài nguyên hạn chế. Đồng thời, cần thúc đẩy nghiên cứu cải tiến vật liệu hấp phụ từ phế phẩm nông nghiệp, như vỏ trấu hoặc xơ dừa, để tạo ra các giải pháp xử lý chi phí thấp nhưng hiệu quả cao. Ngoài ra, nghiên cứu tích hợp các phương pháp xử lý, như kết hợp công nghệ màng và oxy hóa khử, sẽ giúp tối ưu hóa hiệu suất và giảm thiểu tác động phụ. Hướng tới tương lai, việc thiết lập các trung tâm nghiên cứu liên ngành và thúc đẩy hợp tác quốc tế sẽ đóng vai trò quan trọng trong việc tìm kiếm các giải pháp bền vững, đồng thời đảm bảo sự phát triển kinh tế gắn liền với bảo vệ môi trường và sức khỏe cộng đồng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] N. B. B. Nguyen, B. Boruff, and M. Tonts, "Mining, Development and Well-Being in Vietnam: A Comparative Analysis," *The Extractive Industries and Society*, vol. 4, no. 3, pp. 564–575, 2017.
- [2] T. Q. Chu, M. Nevskaya, and O. A. Marinina, "Coal Mines in Vietnam: Geological Conditions and Their Influence on Production Sustainability Indicators," *Sustainability*, vol. 13, no. 21, p. e11800, 2021.
- [3] T. H. Dang, G. K. Do, V. T. Nguyen, and L. D. Tran, "Environmental Assessment of Coastal Sand Mining Using Proposed DPSIR Criteria: A Case of Hai Phong," *Sustainable Marine Structures*, vol. 5, no. 1, pp. 14–23, 2023.
- [4] É. Lèbre and G. Corder, "Integrating Industrial Ecology Thinking Into the Management of Mining Waste," *Resources*, vol. 4, no. 4, pp. 765–786, 2015.
- [5] P. Schneider, K.-D. Oswald, W. Riedel, A. Meyer, G. Schiller, T. Bimesmeier, T. V. A. Pham, and K. L. Nguyen, "Engineering Perspectives and Environmental Life Cycle Optimization to Enhance Aggregate Mining in Vietnam," *Sustainability*, vol. 10, no. 2, 2018, Art. no. 525.
- [6] S. Li, P.X.W. Zou, H. Yu, B. Hu, and X. Wang, "Advantages of Backfill Mining Method for Small and Medium-Sized Mines in China: Safe, Eco-Friendly, and Efficient Mining," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 12, 2023, Art. no. e7280.
- [7] A. Uyar, "Stand-Alone Sustainability Reporting Practices in an Emerging Market: A Longitudinal Investigation," *Journal of Corporate Accounting & Finance*, vol. 28, no. 2, pp. 62–70, 2016.
- [8] A. Fonseca, M. L. McAllister, and P. Fitzpatrick, "Sustainability Reporting Among Mining Corporations: A Constructive Critique of the GRI Approach," *Journal of Cleaner Production*, vol. 84, pp. 70–83, 2014.
- [9] H. V. Phan, N. H. Do, T. T. H. Le, and Q. T. Le, "Assessment of socio-economic environmental impacts caused by stone mining activities for construction materials in Binh Duong province," *Vietnam Journal of Hydrometeorology*, vol. 2, no. 746, pp. 56-69, 2023.
- [10] D. T. B. Hong, "Economic development associated with environmental protection in the period of accelerated industrialization and modernization and the requirements of the Mekong Delta," *TNU Journal of Science and Technology*, vol. 227, no. 09, pp. 507-515, 2022.
- [11] T. T. H. Ung, T. H. Pham, and T. B. Leu, "Assessing the current pollution status and proposing solutions to improve the water quality of urban lakes in Hanoi," *Journal of Construction Science and Technology*, vol. 15, no. 4V, pp. 87-97, 2021.
- [12] K. P. Nickens, S. R. Patierno, and S. Ceryak, "Chromium Genotoxicity: A Double-Edged Sword," *Chemico-Biological Interactions*, vol. 188, no. 2, pp. 276-288, 2010.
- [13] S. Goswami, "Impact of Coal Mining on Environment," *European Researcher*, vol. 92, no. 3, pp. 185-196, 2015.
- [14] M. K. Nguyen, "Research on the application of bakture (back to nature) products to treat polluted surface water," *Journal of Agriculture and Rural Development*, vol. 7, pp. 91-99, 2023.
- [15] N. T. Le, "Assessment of wastewater generation situation in the inner coastal area of Ho Chi Minh City by 2030," *Vietnam Journal of Hydrometeorology*, vol. 6, no. 750, pp. 24-36, 2023.
- [16] T. P. T. Nguyen and V. T. Le, "Assessment of surface water resource evolution in Nam Mang Thit irrigation system adapting to climate change," *Vietnam Journal of Hydrometeorology*, vol. 4, no. 760, pp. 77-90, 2024.
- [17] T. D. Nguyen and V. P. La, "Challenges related to legal conflicts surrounding environmental protection

- issues,” *Journal of Economic and Forecasting*, vol. 10, pp. 1-4, 2023.
- [18] Q. B. Vo, V. T. Nguyen, V. T. Pham, and P. D. T. Van, “Assessing the current situation and proposing measures to reduce the load of wastewater pollution from the main sources of waste in Vinh Long province (in Vietnamese),” *Can Tho University Journal of Science*, vol. 59, pp. 54-64, 2023.
- [19] L. K. Cabatingan, R. C. Agapay, J. L. L. Rakels, M. Ottens, and L. A. M. V. D. Wielen, “Potential of Biosorption for the Recovery of Chromate in Industrial Wastewaters,” *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 40, no. 10, pp. 2302-2309, 2001.
- [20] F. Fu and Q. Wang, “Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review,” *Journal of Environmental Management*, vol. 92, no. 3, pp. 407-418, 2011.
- [21] M.D. Stout, R.A. Herbert, G.E. Kissling, B. J. Collins, G. S. Travlos, K. L. Witt, R. L. Melnick, K. M. Abdo, D. E. Malarkey, and M. J. Hooth, “Hexavalent chromium is carcinogenic to F344/N rats and B6C3F1 mice after chronic oral exposure,” *Environmental Health Perspectives*, vol. 117, no. 5, pp. 716-722, 2009.
- [22] X. Zhang, X. Zhang, X. Wang, L. Jin, Z. Yang, C. Jiang, Q. Chen, X. Ren, J. Cao, Q. Wang, and Y. Zhu, “Chronic occupational exposure to hexavalent chromium causes DNA damage in electroplating workers,” *BMC Public Health*, vol. 11, no. 1, 2011, Art. no. e224.
- [23] M. Suh, D. Wikoff, L. Lipworth, M. Goodman, S. Fitch, L. Mittal, C. Ring, and D. M. Proctor, “Hexavalent chromium and stomach cancer: A systematic review and meta-analysis,” *Critical Reviews in Toxicology*, vol. 49, no. 2, pp. 140-159, 2019.
- [24] M. Tumolo, V. Ancona, D. De Paola, D. Losacco, C. Campanale, C. Massarelli, and V. F. Uricchio, “Chromium pollution in European water, sources, health risk, and remediation strategies: An overview,” *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 17, no. 15, 2020, Art. no. e5438.
- [25] N. Melitas, O. Chuffe-Moscoso, and J. Farrell, “Kinetics of soluble Chromium removal from contaminated water by zerovalent iron media: corrosion inhibition and passive oxide effects,” *Environmental Science & Technology*, vol. 35, no. 19, pp. 3948-3953, 2001.
- [26] D.-S. Ha and A. Coynel, “Preliminary Assessment of Dissolved and Particulate Heavy Metals Transported by the Red River at the Sontay Station,” *Vietnam Journal of Earth Sciences*, vol. 36, no. 3, pp. 281-288, 2015.
- [27] T. T. T. Tran, T. D. Vu, P. L. Nguyen, and T. T. N. Nguyen, “Describe the association between air pollution and hospitalizations for pneumonia in children,” *Can Tho Medical and Pharmaceutical Journal*, no. 73, pp. 187-197, 2024.
- [28] T. T. H. Hoang, M. T. Ha, H. V. Duong, N. S. Bui, H. D. Tran, T. H. Pham, and T. H. Lieu, “Current status of production and waste treatment in chicken farming in Phu Binh district, Thai Nguyen province,” *TNU Journal of Science and Technology*, vol. 226, no. 10, pp. 337-342, 2021.
- [29] V. L. Nguyen and N. D. Tran, “Study on treatment adherence, some related factors and results of HIV pre-exposure prophylaxis in subjects with high-risk behaviors in Ba Ria - Vung Tau province in 2021-2022,” *Can Tho Medical and Pharmaceutical Journal*, no. 54, pp. 124-131, 2023.
- [30] M. Q. Do, D. T. Dao, T. K. T. Tran, and D. H. Cao, “Prevalence of metabolic fatty liver disease in patients with type 2 diabetes,” *Vietnam Medical Journal*, vol. 534, no. 1, pp. 160-164, 2024.
- [31] N. T. Le, “Assessment of wastewater generation situation in the inner coastal area of Ho Chi Minh City by 2030,” *Vietnam Journal of Hydrometeorology*, vol. 6, no. 750, pp. 24-36, 2023.
- [32] T. X. Pham, T. T. Anh, T. T. T. Doan, T. T. N. Hoang, T. D. Pham, T. Y. L. Nguyen, and V. P. Nguyen, “Environmental issues of mining activities in Tay Nguyen,” *Vietnam Journal of Earth Sciences*, vol. 37, no. 2, pp. 139-147, 2015.
- [33] T. M. H. Tran, T. H. N. Tran, D. T. Vu, M. T. Hoang, and M. K. Nguyen, “Assessment of the current status and possibility of water reuse for domestic water supply of some waste sources in An Giang province,” *Vietnam Journal of Hydrometeorology*, vol. 9, no. 765, pp. 60-74, 2024.
- [34] L. Kim, T. N. Truong, T. M. H. Vuong, and V. T. Tran, “Low-cost wastewater treatment technology contributes to sustainable development of water resources in the Mekong Delta region,” *Can Tho University Journal of Science*, vol. 58, pp. 252-257, 2022.
- [35] Q. D. Le, “Concentration of trace metals in rocky oyster (*saccostrea glomerata*) and hard clam (*meretrix lyrata*) in Haiphong coast,” *Vietnam Journal of Marine Science and Technology*, vol. 13, no. 3, pp. 268-275, 2013.
- [36] M. K. Nguyen, “Research on the application of bakture (back to nature) products to treat polluted surface water,” *Agriculture and Rural Development Journal*, vol. 7, pp. 91-99, 2023.
- [37] T. N. C. Le, T. T. Trinh, T. N. Cung, and T. T. U. Do, “Phenol degradation of biofilm formed by bacterial strain isolated from oil polluted water samples collected in Vung Tau,” *Biology Journal*, vol. 38, no. 1, pp. 102-108, 2016.
- [38] T. T. Trinh, K. N. Le, and T. T. H. Ngo, “Review of neonatal infection status at Thanh Hoa Children’s

- Hospital in 2022.” *Vietnam Medical Journal*, vol. 531, no. 1, pp. 282-286, 2023.
- [39] V. Singh, N. Singh, M. Verma, R. Kamal, R. K. Tiwari, M. S. Chivate, S. Nand, K. Kumar, A. Singh, M. Singh, E. Vamanu, and V. Mishra, “Hexavalent-Chromium-Induced Oxidative Stress and the Protective Role of Antioxidants Against Cellular Toxicity,” *Antioxidants*, vol. 11, no. 12, 2022, Art. no. e2375.
- [40] J. Saha, S. Choudhuri, and D. Choudhuri, “Effect of Sub-Chronic Exposure to Chromium on Haematological and Biochemical Parameters of Male Albino Rat,” *Asian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research*, vol. 10, no. 5, 2017, Art. no. e345.
- [41] M. Hassan, W. Abdelwahab, R. Megahed, and A. Mohammed, “An Evaluation of Hepatotoxicity, Nephrotoxicity, and Genotoxicity Induced by Acute Toxicity of Hexavalent Chromium and Comparison of the Possible Protective Role of Selenium and Vitamin E on These Effects,” *Ain Shams Journal of Forensic Medicine and Clinical Toxicology*, vol. 33, no. 2, pp. 48-58, 2019.
- [42] A. A. Khalaf, E. I. Hassanen, M. A. Ibrahim, A. F. Tohamy, M. A. Aboseada, H. M. Hassan, and A. R. Zaki, “Rosmarinic Acid Attenuates Chromium-induced Hepatic and Renal Oxidative Damage and DNA Damage in Rats,” *Journal of Biochemical and Molecular Toxicology*, vol. 34, no. 11, 2020, Art. no. e22579.
- [43] M. Kumar and A. K. Srivastava, “Bioaccumulation of Heavy Metals in Some Tissues of Fish, *Clarias* *Batrachus* Exposed to Sub-Lethal Concentration of Nickel Sulphate and Potassium Dichromate,” *The Scientific Temper*, vol. 13, no. 01, pp. 32-36, 2022.
- [44] M. F. Önen, N. E. Aydın, O. Eksik, P. Demirçivi, and G. Nastin-Saygılı, “Investigation of Boron Adsorption by Graphene Oxide: Equilibrium, Kinetic, and Thermodynamic Studies,” *Turkish Journal of Chemistry*, vol. 47, no. 3, pp. 656-666, 2023.
- [45] M. Rizwan, N. Momina, R. Afzal, A. Noor, Shahzadi, Iram, S. Shireen, R. Aleem, and M. Khan, “Comparative Kinetic Study of the Adsorption Capacity of Walnut Shell and Its Biochar for Chromium Removal From Wastewater,” *International Research Journal of Pure and Applied Chemistry*, vol. 24, no. 6, pp. 17-33, 2023.
- [46] A. Abu-Nada, G. McKay, and A. Abdala, “Recent Advances in Applications of Hybrid Graphene Materials for Metals Removal From Wastewater,” *Nanomaterials*, vol. 10, no. 3, 2020, Art. no. e595.
- [47] T. L. Pham and D. T. Tran, “Conflicts Between Aquaculture and Environmental Protection in Coastal Communities of Vietnam,” *Economics and Development Journal*, vol. 318, no. 2, pp. 20-29, 2024.
- [48] T. H. Mai, N. C. Le, T. M. Nguyen, T. T. H. Nguyen, and V. T. Tran, “Evaluating the Methane Emission Reduction Potential of Several Wastewater Treatment Technology Solutions,” *Journal of Climate Change Science*, no. 24, pp. 1-9, 2022.
- [49] P. Punia, M.K. Bharti, R. Dhar, P. Thakur, and A. Thakur, “Recent Advances in Detection and Removal of Heavy Metals From Contaminated Water,” *Chembioeng Reviews*, vol. 9, no. 4, pp. 351-369, 2022.
- [50] D. D. D. S. Martins, J. C. V. Serra, J. C. Zukowski, and M. M. Pedroza, “Efficiency of Biochars in the Removal of Heavy Metals,” *Acta Brasiliensis*, vol. 3, no. 3, 2019, Art. no. 131.