

TỔNG QUAN VỀ SỰ HIỆN DIỆN VÀ MỘT SỐ PHƯƠNG PHÁP XỬ LÝ CÁC CHẤT PER- VÀ POLYFLUORALKYL (PFAS) TRONG MÔI TRƯỜNG

OVERVIEW OF THE OCCURENCE AND SOME METHODS OF TREATMENT OF PER-AND POLYFLUORALKYL SUBSTANCES (PFAS) IN THE ENVIRONMENT

ThS. Lê Thị Bạch Tuyết

Khoa KT Hạ tầng – Đô thị - Trường ĐHXD Miền Tây

Email: lethibachtuyet@mtu.edu.vn

Điện thoại: 0939 541 348

Ngày nhận bài: 21/11/2022

Ngày gửi phản biện: 07/12/2022

Ngày chấp nhận đăng: 19/12/2022

Tóm tắt:

Các chất per- và polyfluoroalkyl (PFAS) là các hóa chất hữu cơ tổng hợp chống lại sự phân hủy của môi trường. Các đặc tính của PFAS là tính bền bỉ và tích lũy sinh học của chúng. Vì PFAS đã được sử dụng rộng rãi trong nhiều thập kỷ nên sự hiện diện của chúng là hiển nhiên trên toàn cầu, và sự tồn tại lâu dài cũng như khả năng gây độc của chúng tạo ra mối lo ngại đối với môi trường và sinh vật. Nguồn phơi nhiễm đáng kể nhất của con người với PFAS là do chế độ ăn uống (thực phẩm và nước) với sự tiếp xúc bổ sung qua bụi. Để xác định rõ hơn mức độ phơi nhiễm của con người thông qua các sản phẩm động vật, cần phải xác định nồng độ và sự tồn tại của PFAS trong môi trường đất, nước, không khí và trong cơ thể một số loài động vật đại diện. Các nghiên cứu lưu ý rằng hàm lượng PFAS tìm thấy chỉ ở nồng độ thấp từ 0 đến vài trăm pg/m^3 đối với bụi, từ dưới ngưỡng phát hiện đến vài trăm ng/g trọng lượng ướt cơ thể động vật, và dao động tới vài trăm mg/kg trọng lượng khô đối với đất. Đánh giá này tập trung vào PFAS và tổng hợp thông tin từ môi trường, và các loài vật nuôi như một nguồn phơi nhiễm qua chế độ ăn uống ở người, đồng thời thảo luận về một số phương pháp xử lý PFAS.

Từ khóa: các chất per- và polyfluoroalkyl, sự bền vững, tích lũy sinh học, phơi nhiễm.

Abstract:

Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) are organic synthetic chemicals that are resistant to degradation in the environment. The properties of PFAS are persistence and bioaccumulation. Because PFAS have been widely used for many decades, their presence is visible all over the world, and their persistence and potential for toxicity raise concerns about human, animal, and environmental health. Human exposure to PFAS is primarily through dietary intake (food and water), with additional exposure through dust. In order to better determine the extent of human exposure through animal products, it is necessary to determine the concentration and presence of PFAS in soil, water, air and in some representative animal species. The studies noted that PFAS concentrations were found only at low concentrations ranging from 0 to several hundred pg/m³ for dust, from below detection threshold to several hundred ng/g of wet weight of animals, and fluctuation to several hundred mg/kg dry weight for soil. This review focuses on PFAS and synthesizes information from the environment, and domestic animals as a source of dietary exposure in humans and discusses some treatment approaches of PFAS.

Keywords: *per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS), persistence, bioaccumulation, exposure.*

1. Giới thiệu

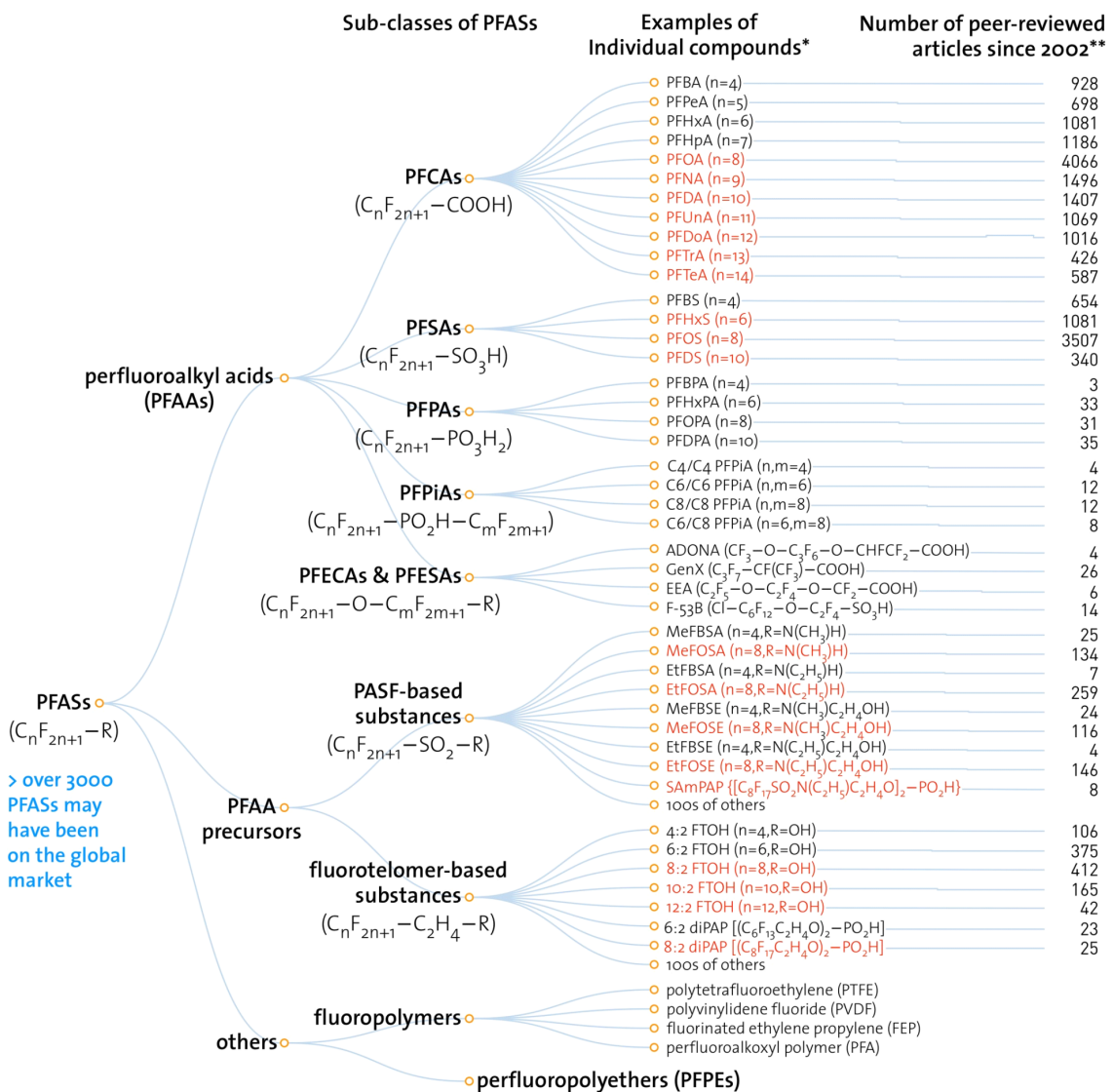
Các chất per- và polyfluoroalkyl (PFAS) là tên gọi chung của một nhóm gồm hơn 3000 hóa chất tổng hợp (Hình 1), được sử dụng rộng rãi trên khắp thế giới từ giữa thế kỷ XX [1]. PFAS là các hợp chất aliphatic có flo hóa cao, khác nhau về nhóm chức năng và độ dài chuỗi cacbon [1]. PFAS, cụ thể hơn là PFAS không polyme, có thể được chia thành hai loại chính: các chất per- và poly- fluoroalkyl. Xét về cấu trúc hóa học cơ bản, PFAS chứa gốc perfluoroalkyl -C_nF_{2n+1} [1,2]. Các chất perfluoroalkyl được phân biệt với các chất polyfluoroalkyl bằng cách được flo hóa hoàn toàn.

Nhiều PFAS có thể làm giảm sức căng bề mặt, có khả năng chống phân hủy ở nhiệt độ cao và chống thấm nước, dầu và

bụi bẩn [4]. Những đặc tính này có nghĩa là chúng đã được sử dụng rộng rãi, ví dụ như trong các chất mạ và phủ kim loại, dầu mỡ, chất bôi trơn, chất kết dính, sơn, chất đánh bóng, sản phẩm tẩy rửa, chất hoạt động bề mặt, sản phẩm chụp ảnh, bao bì, thuốc diệt cỏ và thuốc trừ sâu, sản phẩm dệt và da, và vật liệu chữa cháy, bột chữa cháy [4]. PFAS chống phân hủy sinh học, quang hóa và thủy phân do độ bền của liên kết carbon-fluorine [5]. Tỷ lệ tích lũy sinh học đã được chứng minh là tăng lên khi chiều dài chuỗi carbon tăng lên, được hỗ trợ bởi các nghiên cứu trong đó khả năng tích lũy sinh học của PFOA thấp hơn so với PFOS [4]. Đánh giá này tập trung vào các axit perfluoroalkyl (PFAA) được nghiên cứu thường xuyên nhất: axit erfluorooctanoic (PFOA) và axit

perfluorooctane sulfonic (PFOS). Mặc dù việc sử dụng PFAS đang giảm dần do luật pháp quy định, nhưng PFAS đã được phân phối khắp nơi trong môi trường toàn cầu, quần thể sinh vật và con người, thậm chí còn được tìm thấy ở những vùng sâu vùng xa vì tiềm năng vận chuyển tầm xa của chúng. Ngoài ra, vì PFAS chuỗi ngắn có tính di động cao hơn nên chúng được

tìm thấy ở mức độ cao hơn trong nước uống và các bộ phận ăn được của thực vật [6]. Vì vậy, đánh giá này sẽ tập trung vào việc đánh giá sự hiện diện của PFAS và một số ảnh hưởng của chúng lên môi trường, con người và sinh vật để làm rõ mối nguy hại tiềm năng của PFAS từ đó có những biện pháp giảm thiểu sử dụng để làm giảm nguy cơ tác động của chúng.



Hình 1. "Cây phả hệ" của PFAS [3]

2. Sự xuất hiện và biến đổi của PFAS

Do PFAS có sự tạo thành bởi các liên kết C-F mạnh nên chúng có tính ổn định cao và PFAS khó có thể dễ dàng phân hủy trong môi trường. PFAS trong môi trường đã được tạo ra từ một số nguồn: nước ngầm, nước uống và nước mặt. Các nhà máy xử lý nước thải được coi là nguồn phổ biến nhất của PFAS đối với nước mặt [7]. Ngoài ra, người ta đã quan sát thấy rằng nồng độ cao PFAS có thể tồn tại trong nước mặt gần các khu thương mại và quân sự do sử dụng bột tạo màng nước (AFFF) có chứa PFAS. Các bãi chôn lấp được coi là nguồn điểm quan trọng đối với PFAS trong nước và chúng có thể gây nguy cơ ô nhiễm nước máy. Các phần phụ sau đây minh họa sự xuất hiện khác nhau của PFAS trong các môi trường.

2.1. PFASs trong môi trường nước

Việc phát hiện đồng thời các hợp chất PFAS như perfluoroalkane sulfonate (PFSA) và perfluoroalkyl carboxylate (PFCA) trong các mẫu nước máy tại các địa điểm khác nhau đã làm dấy lên mối lo ngại về nguy cơ sức khỏe tiềm ẩn của chúng. Phát hiện như vậy đã được báo cáo trong các mẫu nước uống ở Châu Âu, Trung Quốc, Malaysia, Thái Lan, Hoa Kỳ, Singapore, Việt Nam và Brazil [7]. Mức độ phơi nhiễm PFAS tăng lên cùng với các sự kiện ô nhiễm nước uống gia tăng khi người ta ước tính rằng lượng PFAS trung bình hàng ngày của con người dao động từ 0,17 đến 0,21 ng/kg trọng lượng cơ thể/ngày tương ứng với PFOS và PFOA [8]. Ngoài ra, PFAS chuỗi ngắn (<8 nguyên

tử carbon) chiếm ưu thế trong các mẫu được lấy từ nước máy với mức tối đa là 42,7 ng/L, tiếp theo là nước khoáng và nước suối [8]. Một nghiên cứu khác cho thấy nồng độ PFAS trong nước được xử lý cao hơn so với nước nguồn, điều này có thể được giải thích bởi khả năng ô nhiễm có thể xảy ra trong khi nước được xử lý di chuyển qua mạng lưới nước và các cơ sở của nhà máy xử lý [9]. PFAS đã được đo lường trong trầm tích ở vịnh, hồ và sông, và trong nước thải từ các nhà máy xử lý nước thải. Một ví dụ về nồng độ PFOS trong nước mặt ở hạ nguồn từ các cơ sở xử lý nước thải bao gồm nồng độ ở Nhật Bản lên tới 157 ng/L [4]. Young-Min Lee et al. [6] cho thấy nồng độ PFAS cao nhất trong mùa thu và thấp nhất trong mùa hè trong hồ Asan, với nồng độ trung bình lần lượt là 270 ± 140 và 81 ± 29 ng/L, với sự khác biệt có ý nghĩa thống kê giữa các mùa ($p < 0,05$). Trong đó, PFAS và PFOA chuỗi ngắn đã được phát hiện trong cả bốn mùa. Ngoài ra, một nghiên cứu khác ở cửa sông Shuangtaizi bị ô nhiễm bởi PFAS với tổng nồng độ dao động từ 66,2 đến 185 ng/L và từ 44,8 đến 209 ng/L tương ứng trong nước mặt và nước đáy của cửa sông [7]. Những kết quả tổng quan trên cho thấy mức PFAS rất cao khi mức nước uống dựa trên sức khỏe là 0,04 g/L được đánh giá là phơi nhiễm bảo vệ suốt đời thông qua phơi nhiễm đánh giá rủi ro [10].

2.2. PFASs trong không khí

Nồng độ PFAS trong các mẫu không khí và bụi trong nhà cao hơn đáng kể so với nồng độ được tìm thấy ngoài trời

khi không có nguồn điểm công nghiệp, ví dụ: nồng độ PFOS trong nhà và văn phòng ở Châu Âu, Hàn Quốc và Bắc Mỹ dao động trong khoảng $<1,0\text{--}400\text{ pg/m}^3$ và nồng độ ngoài trời dao động trong khoảng $<1,0\text{--}150\text{ pg/m}^3$ [4]. Trong nghiên cứu của Young-Min Lee et al. [6] cho thấy nồng độ của PFAS trong các mẫu không khí là $20,7\text{--}98,2\text{ pg/m}^3$. Nhóm thuộc PFAS chiếm ưu thế trong không khí là PFOA (75,9% tổng số). Mức PFAS quan sát được ở Thâm Quyển, Trung Quốc (khoảng: $3,4\text{--}34\text{ pg/m}^3$) [11], trong khi PFAS trong các mẫu thu được từ sông Hyung-san, nằm gần một khu công nghiệp ở Hàn Quốc phạm vi: $0\text{--}198\text{ pg/m}^3$ [12]. PFAS trong các mẫu không khí hiện diện chủ yếu ở pha khí. Trong số các loại PFAS khác nhau, PFOA (81,6% tổng số) là loại pha khí chiếm ưu thế và PFOS (58,7% tổng số) loại pha hạt chiếm ưu thế. Những kết quả này làm nổi bật sự khác biệt trong phân vùng hạt khí giữa PFOA và PFOS. Tỷ lệ PFOS/PFOA (nghĩa là tỷ lệ nồng độ) là 0,01 ở pha khí và 3,54 ở pha hạt [6]. PFAS trong khí quyển thể hiện mối tương quan tích cực với $\text{PM}_{2,5}$ và PM_{10} , và do đó mức $\text{PM}_{2,5}$ và PM_{10} cao trong mùa đông và mùa xuân ở miền Nam Hàn Quốc có thể làm tăng khả năng hấp phụ của PFAS. Bên cạnh đó, PFAS cũng có mối tương quan chặt chẽ với sự thay đổi mùa trong năm bởi sự bốc hơi nước vào khí quyển [6].

2.3. PFASs trong đất

Nồng độ PFAS nền trong đất so với nồng độ nhìn thấy tại các địa điểm bị ô nhiễm trên toàn cầu gần đây đã được xem

xét. Nồng độ được báo cáo cho các vị trí bị ô nhiễm PFAS thường lớn hơn theo cấp độ so với nồng độ nền, đặc biệt đối với PFOS, dao động lên tới vài trăm mg/kg. Trong số các PFAS khác, PFOA và PFOS được tìm thấy trong bùn hoặc chất rắn sinh học từ các nhà máy xử lý nước thải với tần suất phát hiện 80–100%, do đó, việc áp dụng cho đồng cỏ gây lo ngại về sự tích tụ trong các mô ăn được của động vật làm thức ăn. Nồng độ PFAS trong báo cáo tổng quan của Clare Death et al. [4] cho thấy rằng chất rắn sinh học đã được tìm thấy nằm trong khoảng từ 1 đến $244\text{ }\mu\text{g/kg}$ trọng lượng khô (dw) PFOA và $5\text{--}3120\text{ }\mu\text{g/kg dw}$ PFOS ở Hoa Kỳ, từ 4,3 đến $89\text{ }\mu\text{g/kg dw}$ PFOS ở và từ 4,7 đến $86\text{ }\mu\text{g/kg dw}$ PFOS ở Úc. Nồng độ của PFOS trong đất của các cánh đồng biến tính sinh học đã được đo lên tới $483\text{ }\mu\text{g/kg dw}$. Một số nghiên cứu cho thấy việc ứng dụng và tái sử dụng bùn thải từ các nhà máy xử lý nước thải trong đất nông nghiệp là một trong những nguồn chính góp phần gây ô nhiễm PFAS cho đất [13]. Hợp chất PFAS trong đất ở các vùng ven biển có thể được thải ra từ các nguồn trực tiếp có thể làm tăng nồng độ PFAS lên tới khoảng $8\text{--}50\text{ }\mu\text{g/kg}$ đất đã được báo cáo ở đất Trung Quốc [14]. Một mối quan tâm chính về PFAS trong đất là khả năng giải phóng và mang theo PFAS của thực vật cũng như khả năng PFAS có thể ngấm vào các lớp đất bên dưới và nước ngầm. Kết quả này đã được xác nhận [15] khi tìm thấy rơm và hạt của cây ngô có cùng các nhóm chức carboxylic và sulfonic như trong đất bị ô

nhiệm đề cập đến mối tương quan trực tiếp giữa ô nhiễm PFAS của đất và cây trồng.

2.4. PFASs trong cơ thể động vật

PFASs được phát hiện trong các mẫu mô động vật. Nghiên cứu của Young-Min Lee [6] đã phát hiện nồng độ PFAS trong cá dao động từ dưới ngưỡng phát hiện đến 197 ng/g trọng lượng. PFSA trong mẫu cá chiếm 62,2% PFAS. Các loài PFAS chiếm ưu thế trong cá là perfluoro-1-octane sulfonate (L-PFOS), tiếp theo là PFDA. Trong số PFAS, PFCA chuỗi dài với $n \geq 10$ và L-PFOS được phát hiện thường xuyên nhất ở cá. Các tiền chất của PFOS như perfluorooctane sulfonamide (FOSA) chiếm khoảng 1,1% tổng số PFAS trong cá. Nồng độ trung bình của PFAS là $17,6 \pm 10,0$ ng/g trọng lượng ướt ở cá diếc, $30,5 \pm 25,3$ g/g trọng lượng ướt ở cá skygager, $32,4 \pm 11,0$ g/g trọng lượng ướt ở cá bluegill, $40,3 \pm 13,7$ ng/g trọng lượng ướt ở cá vược, $16,7 \pm 2,7$ ng/g ở ngựa vằn và $50,6 \pm 71,6$ ng/g trọng lượng ướt ở cá chép. Ngoài ra, Lutz Ahrens et al. [16] cho thấy PFAS được phát hiện trong các mô máu, gan, cơ, mang và tuyến sinh dục ở cá rô từ Hồ Halmsjön. Nồng độ PFAS trung bình cao nhất được phát hiện trong máu với 5900 ± 900 ng/g, tiếp theo là gan (3900 ± 500 ng/g trọng lượng ướt), mang (2100 ± 700 ng/g trọng lượng ướt), tuyến sinh dục (1600 ± 800 ng/g trọng lượng ướt) và cơ (330 ± 190 ng/g trọng lượng ướt). Các nghiên cứu ở Trung Quốc đã chỉ ra rằng tổng nồng độ PFAS trong các mẫu máu khi gần các khu vực đô thị hóa (tức

là động vật trong vườn thú) cao hơn một bậc so với nồng độ ở khí hoang dã (tức là động vật bảo tồn thiên nhiên) [4]. Nồng độ của PFAS được xác định trong cơ và cá nguyên con của sáu loài được thu thập từ Charleston, Nam Carolina. Nồng độ PFAS trung bình thay đổi từ 12,7 đến 33,0 ng/g trọng lượng ướt (ww) ở cá nguyên con và 6,2–12,7 ng/g trọng lượng ướt ở phi lê. Đối với cá nguyên con riêng lẻ, PFAS dao động từ 12,7 ng/g ww ở cá đối sọc đến 85,4 ng/g ww ở cá hồi đốm, và ở cá phi lê, các giá trị riêng lẻ nằm trong khoảng từ 6,2 ng/g ww ở cá đối sọc đến 27,9 ng/g ww ở cá đối đốm [17]. Một số nghiên cứu PFAS trên gia súc đã chứng minh rằng nồng độ PFAS ở động vật bị phơi nhiễm sẽ cao nhất trong máu, gan và thận, với một số tích tụ trong mỡ và cơ, và có khả năng chuyển sang sữa. Sự lưu thông trong ruột và gan của PFOS dẫn đến sự hiện diện kéo dài của PFOS trong huyết tương, trong khi PFOA được bài tiết gần như hoàn toàn [4]. Một số nghiên cứu về khả năng bài tiết của PFOS và PFOA ở bò khi cho chúng uống PFOA liều cao (1mg/kg) ở 4 con bò Angus ở Hoa Kỳ và phát hiện ra rằng PFOA được bài tiết hoàn toàn qua nước tiểu trong vòng 9 ngày sau khi dùng thuốc với thời gian bán thải trong huyết tương <20 giờ. Còn PFOS (8mg/kg) được tìm thấy trong đường bài tiết chính là qua phân ($11 \pm 1,3\%$), với lượng bài tiết tối thiểu qua nước tiểu ($0,5 \pm 0,07\%$) và nồng độ trong mô giảm theo thứ tự: gan > mỡ lũng > thận > mỡ trong phúc mạc > phổi > lách > cơ. Nồng độ PFOS cao trong gan

và mật, và sự hiện diện kéo dài của PFOS trong huyết tương, cho thấy vai trò quan trọng của tuần hoàn ruột gan đối với sự hiện diện và sự phân bố của chúng. Tuy nhiên, PFOS tồn tại trong sữa bò với lượng rất ít $\leq 2\%$ liều lượng ước tính đã được tính toán [18]. PFOA cũng được tìm thấy với nồng độ ở thận và gan là $42 \pm 7,0 \mu\text{g/kg}$ và $50 \pm 4,8 \mu\text{g/kg}$ trong nghiên cứu trên lợn [19]. Nghiên cứu PFAS trên gà cũng chỉ ra rằng ở gà thịt, nồng độ PFOS trong gan và máu cao hơn so với thận, trong khi nồng độ PFOA cao nhất ở thận và được đào thải nhanh [20,21].

3. Một số nghiên cứu về PFAS trên người

Cơ quan Nghiên cứu Ung thư Quốc tế (IARC) đã phân loại axit perfluorooctanoic (PFOA), chất per- và polyfluoroalkyl (PFAS) được nghiên cứu kỹ lưỡng nhất, là chất có thể gây ung thư ở người [22] một phần dựa trên bằng chứng dịch tễ học hạn chế về mối liên hệ với bệnh ung thư của thận và tinh hoàn ở những đối tượng tiếp xúc nhiều vào năm 2017.

Trong nghiên cứu lớn nhất cho đến nay về mối liên quan của PFAS với nguy cơ ung thư thận, Jonathan Hofmann, Tiến sĩ, MPH, điều tra viên theo dõi nhiệm kỳ tại Chi nhánh Dịch tễ học Môi trường Nghề nghiệp và các cộng tác viên, đã phát hiện ra rằng những người tham gia nghiên cứu có nồng độ PFOA cao nhất trong huyết thanh của họ có nguy cơ phát triển ung thư thận cao hơn gấp đôi so với những người có nồng độ thấp nhất. Một nghiên cứu khác của Tiến sĩ Mark Purdue liên

quan đến PFAS trong huyết thanh và nguy cơ ung thư tinh hoàn trong Kho lưu trữ huyết thanh của Bộ Quốc phòng Hoa Kỳ. Các địa điểm quân sự có lịch sử sử dụng bột chữa cháy đã được xác định là nguồn gây ô nhiễm nước PFAS chính cho một số cộng đồng. Bằng chứng hạn chế cho thấy PFOA có liên quan đến tăng nguy cơ ung thư tinh hoàn [23].

Một nghiên cứu kiểm soát trường hợp lồng ghép về nồng độ PFAS trong huyết thanh và ung thư buồng trứng và nội mạc tử cung trong thử nghiệm sàng lọc ung thư. Đây là nghiên cứu đầu tiên đánh giá trực tiếp mức độ phơi nhiễm của cá nhân với PFAS thông qua xét nghiệm huyết thanh học trong các mẫu được thu thập trước khi chẩn đoán ung thư buồng trứng và nội mạc tử cung. Bằng cách sử dụng thiết kế kiểm soát trường hợp lồng nhau trong PLCO, NCI sẽ đánh giá các mẫu huyết thanh được thu thập sau khi mãn kinh từ 318 trường hợp ung thư buồng trứng, 430 trường hợp ung thư nội mạc tử cung và một nhóm đối chứng chung gồm 589 phụ nữ không bị ung thư [22].

Nghiên cứu kiểm soát trường hợp lồng ghép về nồng độ PFAS trong huyết thanh và nguy cơ ung thư tuyến tiền liệt trong thử nghiệm sàng lọc ung thư. Bằng chứng từ các nghiên cứu nghề nghiệp và cộng đồng cho thấy rằng mức độ cao của PFOA và các hóa chất perfluor hóa khác có thể liên quan đến việc tăng nguy cơ mắc và tử vong do ung thư tuyến tiền liệt. Tuy nhiên, bằng chứng còn hạn chế và không hoàn toàn nhất quán. Lĩnh cứu hỏa, những

người có nồng độ PFOA cao do tiếp xúc nghề nghiệp với bột chữa cháy, có nguy cơ ung thư tuyến tiền liệt cao hơn so với dân số nói chung [22].

Mức độ PFAS huyết thanh và rủi ro của ung thư hạch không Hodgkin và ung thư tuyến giáp. Mục tiêu của nghiên cứu này là điều tra xem liệu nồng độ PFAS được chọn trong huyết thanh trước khi chẩn đoán tăng cao có liên quan đến việc tăng nguy cơ ung thư hạch không Hodgkin (NHL) và ung thư tuyến giáp hay không [22].

4. Một số phương pháp xử lý PFAS trong môi trường

Các tài liệu trình bày các phương pháp xử lý khác nhau của PFAS trong các môi trường khác nhau. Cố định và phá hủy hồ quang plasma là một trong những phương pháp được khuyến nghị để chuyển đổi không thể đảo ngược chất thải PFAS. Một số nghiên cứu ủng hộ việc sử dụng phương pháp đốt ở nhiệt độ cao cũng như việc sử dụng plasma phá hủy PFAS trong chất thải. Thẩm thấu ngược (RO) [24] thường có khả năng đặc biệt để di chuyển các vật liệu PFAS. RO tạo ra dòng chất thải chứa tất cả các chất gây ô nhiễm không đi qua màng. Do đó, tất cả các vật liệu PFAS sẽ được cô đặc thành một dòng xấp xỉ 35 gpm. Do trọng lượng phân tử, tính kỵ nước của phân tử và điện tích nên RO sẽ có thể loại bỏ các vật liệu PFAS tới hơn 99,9%. Ngoài việc loại bỏ này, RO còn loại bỏ một loạt các chất gây ô nhiễm khác, chẳng hạn như TOC, chất rắn lơ lửng và ô nhiễm ion. Tuy nhiên, cần

phải xem xét lại toàn diện để có hiểu biết rõ ràng về quá trình biến đổi, di chuyển và xử lý các chất này trong hệ sinh thái và ảnh hưởng tiềm ẩn của chúng đối với sự hình thành thứ cấp của PFOS và PFOA.

Bảng 1. Các công nghệ xử lý PFAS tiềm năng [7]

Cơ chế	Quy trình xử lý
Xử lý phá hủy	Quá trình oxy hóa nâng cao Oxy hóa điện hóa Thiêu hủy Sóng siêu âm Phân hủy sinh học Quang phân
Xử lý không phá hủy	Hấp phụ Trao đổi ion Phân số

Sự hấp phụ thông qua than hoạt tính và nhựa trao đổi ion đã được sử dụng rộng rãi, đặc biệt là để xử lý bơm và xử lý để chiết xuất PFAS từ nước ngầm bị ô nhiễm. Than hoạt tính dạng hạt để loại bỏ PFAS đã được khuyến nghị là một quy trình rẻ hơn và đây là công nghệ xử lý được công nhận nhất đối với nước ngầm bị ô nhiễm bởi PFOS và PFOA. Hiệu suất loại bỏ các chất polyfluoroalkyl bằng than hoạt tính dạng hạt là >90%, nhưng động học hấp phụ thường nhanh hơn đối với PFAS chuỗi dài. Các PFAS chuỗi ngắn có nhiều khả năng dễ phân tách qua than hoạt tính dạng hơn chuỗi dài dẫn đến việc dự trữ GAC đã qua sử dụng sẽ trở thành mối lo ngại nghiêm trọng về quản lý chất thải nguy hại. Các phương pháp như quá trình oxy hóa nâng cao (AOPs) bằng kết hợp của

ozon, chất xúc tác và lưu huỳnh đã được thực hiện trong các thí nghiệm ozon hóa ở quy mô phòng thí nghiệm. Trong thiết lập ở quy mô thí điểm, trong vòng ba giờ xử lý, nồng độ của tất cả PFAS được phân tích đã giảm đáng kể. Trong một nghiên cứu khác, xử lý bằng âm thanh bằng cách sử dụng máy siêu âm công suất cao ở quy mô thí điểm đã được thực hiện để xử lý axit 2,4,5-trichlorophenoxyacetic. Có thể kết luận rằng quá trình xử lý bằng âm hóa học có hiệu quả trong việc loại bỏ các hợp chất hữu cơ (>90%) trong thời gian rất ngắn (vài phút).

Bảng 2. Tóm tắt hiệu suất của các loại chất hấp phụ khác nhau trong việc xử lý PFAS [7]

Chất hấp phụ	Chất bị hấp phụ	Điều kiện hoạt động	Khả năng hấp phụ
Khoáng vật sét (diện tích bề mặt: 67,52 m ² /g)	PFOS	Nồng độ ban đầu của chất hấp phụ 400 mg/L; pH=7; nồng độ của chất bị hấp phụ 0,2 mg/L	0,29–0,31 mg/g
Cao lanh (diện tích bề mặt: 11.9 m ² /g)	PFOS	Nồng độ ban đầu của chất hấp phụ 5000 mg/L; pH=7; nồng độ của chất bị hấp phụ 0,95 mg/L	0,08 mg/g
Nhôm oxit (diện tích bề mặt: 88,6 m ² /g)	PFOA	Nồng độ ban đầu của chất hấp phụ 10000 mg/L; pH=4,3; nồng độ của chất bị hấp phụ 0,1 mg/L	0,16 x 10 ⁻³ mg/g
Than chì xốp (diện tích bề mặt: 2870 m ² /g)	PFOS	Nồng độ ban đầu của chất hấp phụ 100 mg/L; pH=5; nồng độ của chất bị hấp phụ 100 mg/L	1240 mg/g
Than sinh học từ rơm ngô (diện tích bề mặt: 7,21 m ² /g)	PFOS	Nồng độ ban đầu của chất hấp phụ 200-1200 mg/L; pH=7; nồng độ của chất bị hấp phụ 100 mg/L	91,6 mg/g
Chitosan (diện tích bề mặt: 2870 m ² /g)	PFOS	Nồng độ ban đầu của chất hấp phụ 1350 mg/L; pH=3; nồng độ của chất bị hấp phụ 50 mg/L	645 mg/g
Zeolite NaY80 (surface area: 780 m ² /g)	PFOS	Nồng độ ban đầu của chất hấp phụ 1000 mg/L; nồng độ của chất bị hấp phụ 150 mg/L; kích thước hạt 3-12mm	114,7 mg/g
Than hoạt tính từ sinh khối lá	PFOA PFOS	Than hoạt tính biến tính (AC-H ₃ PO ₄) sản xuất từ lá, kích thước hạt đồng nhất >64 µm	159,61 mg/g 208,64 mg/g

Chất hấp phụ	Chất bị hấp phụ	Điều kiện hoạt động	Khả năng hấp phụ
Silica biến đổi	PFOS	Diện tích bề mặt 650 m ² /g, Kích thước hạt: 250-450 μm, Thể tích lỗ rỗng: 1,03 mL/g	55 mg/g
Boehmite	PFOS	Diện tích bề mặt 299 m ² /g, Kích thước hạt trung bình 37,02 μm	0,1529 μg/m ²
Hạt nano nhôm	PFOS	Diện tích bề mặt: 83 m ² /g, Kích thước hạt: 13 nm	Ở 30°C: 589 mg/g, ở 40°C: 485 mg/g, ở 50°C: 447 mg/g

5. Kết luận

PFAS tích tụ trong môi trường gây ra mối đe dọa nghiêm trọng đối với cuộc sống con người. Vì vậy, đặc tính và hành vi của PFAS cần được giải thích rõ hơn, đặc biệt là về quá trình xuất hiện, biến đổi và suy thoái. Nhiều quốc gia đang nỗ lực loại bỏ dần các chất PFAS và tìm các chất thay thế cho các chất PFAS. Nỗ lực này đã làm giảm mức độ PFAS, đặc biệt là trong nước bề mặt. Mặc dù các hóa chất thay thế sẽ ít độc hại hơn và không tồn tại trong môi trường, nhưng quy trình loại bỏ dần dần không dẫn đến việc loại bỏ hoặc giảm PFAS khi nhiều ngành công nghiệp mới có xu hướng giải phóng PFAS. Điều này có thể đòi hỏi nhiều nỗ lực hơn trong việc tìm hiểu các biện pháp để loại bỏ dần dần.

Thời gian tiếp xúc với hợp chất PFAS càng lâu thì rủi ro càng cao do sự hấp thu nhanh của PFAS. Vẫn còn thiếu thông tin chính xác về độc tính của PFAS và các giá trị ngưỡng mà PFAS có thể gây ra rủi ro sức khỏe nghiêm trọng. Các tiêu chuẩn PFAS không thống nhất do mức độ và tỷ lệ PFAS không nhất quán trong cùng một quốc gia và trên toàn cầu. Đánh giá nhấn mạnh sự cần thiết phải nghiên cứu thêm để xác định các đặc điểm, sự hiện diện, tần suất và mức độ nghiêm trọng của PFAS theo thời gian và mức độ tiếp xúc để hiểu rõ hơn về bản chất của PFAS.

Tài liệu tham khảo

[1] Buck, R.C., Franklin, J., Berger, U., Conder, J.M., Cousins, I.T., De Voogt, P., Jensen, A.A., Kannan, K., Mabury, S.A., van Leeuwen, S.P., 2011. Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances in the environment: terminology, classification, and origins. *Integr. Environ. Assess. Manag.* **7** pp.513–541.

[2] Ahrens, L., Bundschuh, M., 2014. Fate and effects of poly- and perfluoroalkyl

substances in the aquatic environment: a review. *Environ. Toxicol. Chem.* **33** pp.1921–1929.

[3] Zhanyun Wang, Jamie C. DeWitt, Christopher P. Higgins, and Ian T. Cousins, 2017. A Never-Ending Story of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs)? *Environmental Science and Technology* **51** (2017) 2508-2518

[4] Clare Death, Cameron Bell, David Champness, Charles Milne, Suzie Reichman, Tarah Hagen, 2021. Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in livestock and game species: A review. *Science of the Total Environment* **774** (2021) 144795.

[5] Sznajder-Katarzyńska, K., Surma, M. & Cieřlik, I. (2019). A review of Perfluoroalkyl Acids (PFAAs) in terms of sources, applications, human exposure, dietary intake, toxicity, legal regulation, and methods of determination. *Journal of Chemistry* 2019/2717528.

[6] Young-Min L., Ji-Young L., Moon-Kyung K., Heedeuk Y., Jung-Eun L., Yeongjo S., Younglim K., Kyungho C., Kyung-Duk Z., 2019. Concentration and distribution of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in the Asan Lake area of South Korea. *Journal of Hazardous Materials* **381** (2020) 120909

[7] Ziyad Abunada, Motasem Y. D. Alazaiza and Mohammed J. K. Bashir, 2020. An Overview of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in the Environment: Source, Fate, Risk and Regulations. *Water* **12** 3590.

[8] Gellrich, V.; Brunn, H.; Stahl, T., 2013. Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in mineral water and tap water. *J. Environ. Sci. Health Part A Toxic/Hazard. Subst. Environ. Eng.* **48** pp.129–135.

[9] Lu, Z.; Lu, R.; Zheng, H.; Yan, J.; Song, L.; Wang, J.; Yang, H., 2018. Risk exposure assessment of per-and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in drinking water and atmosphere in central eastern China. *Environ. Sci. Pollut. Res.* **25** pp.9311–9320.

[10] Post, G.B.; Louis, J.B.; Cooper, K.R.; Boros-Russo, B.J.; Lippincott, R.L, 2009. Occurrence and Potential Significance of Perfluorooctanoic Acid (PFOA) Detected in New Jersey Public Drinking Water Systems. *Environ. Sci. Technol.* **43** pp.4547–4554.

[11] Liu, B., Zhang, H., Yao, D., Li, J., Xie, L., Wang, X., Wang, Y., Liu, G., Yang, B., 2015. Perfluorinated compounds (PFCs) in the atmosphere of Shenzhen, China: spatial distribution, sources and health risk assessment. *Chemosphere* **138** pp.511–518

[12] Seo, S.-H., Son, M.-H., Shin, E.-S., Choi, S.-D., Chang, Y.-S., 2019. Matrix-specific distribution and compositional profiles of perfluoroalkyl substances (PFASs) in multimedia environments. *J. Hazard. Mater.* **364** 19–27.

[13] Lee, H.; Tevlin, A.G.; Mabury, S.A.; Mabury, S.A., 2014. Fate of Polyfluoroalkyl Phosphate Diesters and Their Metabolites in Biosolids-Applied Soil: Biodegradation and Plant Uptake in Greenhouse and Field Experiments. *Environ. Sci. Technol.* **48**(1) pp.340-349

- [14] Ghisi, R.; Manzetti, S., 2019. Accumulation of perfluorinated alkyl substances (PFAS) in agricultural plants: A review. *Environ. Res. J.* **169** pp.326–341
- [15] Lechner, M.; Knapp, H., 2011. Carryover of Perfluorooctanoic Acid (PFOA) and Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) from Soil to Plant and Distribution to the Different Plant Compartments Studied in Cultures of Carrots (*Daucus carota* ssp. *Sativus*), Potatoes (*Solanum tuberosum*), and cucumbers (*Cucumis sativus*). *J. Agric. Food Chem.* **59**(20) 11011–11088.
- [16] Lutz Ahrens, Karin Norström, Tomas Viktor, Anna Palm Cousins and Sarah Josefsson, 2014. Stockholm Arlanda Airport as a source of per- and polyfluoroalkyl substances to water, sediment and fish. *Chemosphere* **03** (2014) 136 0045-6535
- [17] Patricia A. Faira, Beth Wolf, Natasha D. White, Stephen A. Arnott, Kurunthachalam Kannan, Rajendiran Karthikraj, John E. Vena, 2019. Perfluoroalkyl substances (PFASs) in edible fish species from Charleston Harbor and tributaries, South Carolina, United States: Exposure and risk assessment. *Environmental Research* **171** (2019) pp.266-277
- [18] Kowalczyk, J., et al., 2012. Transfer of perfluorooctanoic acid (PFOA) and perfluorooctane sulfonate (PFOS) from contaminated feed into milk and meat of sheep: pilot study. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* **63** (2), 288–298.
- [19] Xie, S., Cui, Y., Yang, Y., Meng, K., Pan, Y., Liu, Z., Chen, D., 2020. Tissue distribution and bioaccumulation of 8: 2 fluorotelomer alcohol and its metabolites in pigs after oral exposure. *Chemosphere* **249** 126016.
- [20] Yeung et al. (2009) Biochemical Responses and Accumulation Properties of Long-Chain Perfluorinated Compounds (PFOS/PFDA/PFOA) in Juvenile Chickens (*Gallus gallus*) - *Arch Environ Contam Toxicol*, **57** pp.377–386.
- [21] Yoo, H., Guruge, K.S., Yamanaka, N., Sato, C., Mikami, O., Miyazaki, S., Yamashita, N., Giesy, J.P., 2009. Depuration kinetics and tissue disposition of PFOA and PFOS in white leg- horn chickens (*Gallus gallus*) administered by subcutaneous implantation. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* **72** pp.26–36.
- [22] Division of Cancer Epidemiology & Genetics (DCEG), 2020. *PFAS Exposure and Risk of Cancer* [Online]. View at: < <https://dceg.cancer.gov/research/what-we-study/pfas> > [Access 18/11/2022]
- [23] Joseph J. S., Catherine L. C., Antonia M. C., Wen-Yi H., Rena R. J., Venkata S. S., Neal D. F., Joshua N. S., Debra T. S., Mark P. P., Jonathan N. H., 2021. Serum Concentrations of Per- and Polyfluoroalkyl Substances and Risk of Renal Cell Carcinoma. *JNCI: Journal of the National Cancer Institute* **113** (5) pp. 580–587
- [24] Environmental Protection Agency (EPA) in US, 2020. PFAS removal in the United States. Water Technologies and Solutions Technical Paper.