VNU Journal of Science: Natural Sciences and Technology

Journal homepage: https://js.vnu.edu.vn/NST

Original Article

A Review on Analytical Methods for Perfluoroalkyl Substances (PFAS) in Settled Dust Samples

Luu Mai Anh[1], Tran Thi Lieu[1,2], Nguyen Thi Anh Huong[1], Nguyen Thi Quynh Hoa[3], Dinh Hoang Anh[1], Le Duc Dung[1], Le Huu Tuyen[1], Hoang Quoc Anh[1,*]

[1]*VNU University of Science, 19 Le Thanh Tong, Hoan Kiem, Hanoi, Vietnam*

[2]*Vietnam National Institute of Occupational Safety and Health, 99 Tran Quoc Toan, Hanoi, Vietnam*

[3]*Hung Yen University of Technology and Education, Khoai Chau, Hung Yen, Vietnam*

Received 11th May 2024

Revised 15th April 2025; Accepted 26th April 2025

Abstract: Perfluoroalkyl substances (PFAS) have outstanding properties such as chemically inert, thermally stable, and water/oil repellent, which have been commonly used as additives in different materials and existed in various equipment, household items, and consumer products. However, PFAS are persistent organic pollutants (POPs) because of their environmental persistence, long-range transport, bioaccumulation potentials, and toxic effects on organisms. Settled dust can serve as environmental sink of organic pollutants including PFAS, and as exposure source of these substances in humans. In general, number of studies on PFAS in settled dust is relatively limited, especially in emerging and developing countries. In this review paper, analytical methods for PFAS in settled dust samples from international publications were gathered and evaluated, including information about sampling, sample preparation, extraction, clean-up, and quality assurance/quality control techniques. To determine trace levels of PFAS in dust matrix, liquid chromatography-tandem mass spectrometry (LC-MS/MS) methods have been used with advantages as high selectivity and low detection limits. Further studies on analytical method development and application in monitoring and assessment of polution status and risk of PFAS in settled dust are critically necessary.

Keywords: PFAS, settled dust, analytical method, LC-MS/MS.

* Corresponding author.
E-mail address: hoangquocanh1990@gmail.com

https://doi.org/10.25073/2588-1140/vnunst.5686

Tổng quan về phương pháp phân tích các hợp chất perfluoroalkyl (PFAS) trong mẫu bụi lắng

Lưu Mai Anh[1], Trần Thị Liễu[1,2], Nguyễn Thị Ánh Hường[1], Nguyễn Thị Quỳnh Hoa[3], Đinh Hoàng Anh[1], Lê Đức Dũng[1], Lê Hữu Tuyến[1], Hoàng Quốc Anh[1,*]

[1]*Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội, 19 Lê Thánh Tông, Hà Nội, Việt Nam*

[2]*Viện Khoa học An toàn và Vệ sinh lao động, 99 Trần Quốc Toản, Hà Nội, Việt Nam*

[3]*Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Hưng Yên, Khoái Châu, Hưng Yên, Việt Nam*

Nhận ngày 11 tháng 5 năm 2024
Chỉnh sửa ngày 15 tháng 4 năm 2025; Chấp nhận đăng ngày 26 tháng 4 năm 2025

Tóm tắt: Các hợp chất perfluoroalkyl (PFAS) có tính chất ưu việt như trơ về mặt hóa học, bền nhiệt, chống bám dính nên được sử dụng rộng rãi làm phụ gia trong nhiều loại vật liệu và có mặt trong nhiều thiết bị, đồ gia dụng, sản phẩm tiêu dùng. Tuy nhiên, PFAS cũng được coi là các chất ô nhiễm hữu cơ khó phân hủy (POP) do chúng bền vững trong môi trường, có khả năng phát tán xa, có thể tích lũy sinh học và gây ra những tác động độc hại với sinh vật. Bụi lắng là môi trường tích lũy các chất ô nhiễm hữu cơ bao gồm PFAS và là nguồn phơi nhiễm các hợp chất này trên cơ thể người. Nhìn chung, số lượng các nghiên cứu về PFAS trong bụi lắng còn tương đối hạn chế, đặc biệt ở các nước mới và đang phát triển. Trong nghiên cứu tổng quan này, phương pháp phân tích PFAS trong mẫu bụi được tổng hợp và đánh giá dựa trên các công bố quốc tế, bao gồm thông tin về kỹ thuật lấy mẫu, chuẩn bị mẫu, chiết mẫu, làm sạch dịch chiết, phân tích định lượng và các kỹ thuật đảm bảo chất lượng, kiểm soát chất lượng. Để phân tích lượng vết PFAS trong nền mẫu bụi, phương pháp sắc ký lỏng ghép nối khối phổ hai lần (LC-MS/MS) đã được sử dụng với ưu điểm về độ chọn lọc cao và giới hạn phát hiện thấp. Các nghiên cứu tiếp theo về phát triển quy trình phân tích và áp dụng quan trắc, đánh giá ô nhiễm và rủi ro của PFAS trong bụi lắng là rất cần thiết.

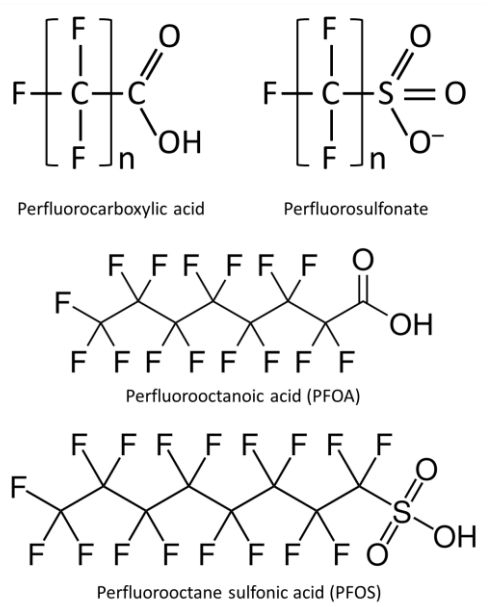
Từ khóa: PFAS, bụi lắng, phương pháp phân tích, LC-MS/MS.

1. Mở đầu

Các hợp chất perfluoroalkyl (PFAS) trong phân tử bao gồm mạch alkyl kỵ nước có độ dài khác nhau (thường là $–C_4H_9$ đến $–C_{16}H_{33}$) và nhóm chức ưa nước (ví dụ như nhóm sulfonate $–SO_3^-$ hoặc carboxylic acid –COOH), dẫn đến tính chất bề mặt đặc biệt của các hợp chất này [1]. Công thức cấu tạo tổng quát của nhóm perfluorosulfonate (PFS) và perfluorocarboxylic acid (PFCA) được trình bày trong Hình 1. Các chất PFAS được sử dụng rộng rãi trên thế giới từ những năm 1950 với các ứng dụng chính như lớp phủ bề mặt chống dính, chất hoạt động bề mặt, chất bôi trơn, lớp phủ cho sợi dệt, dầu đánh bóng, bao bì thực phẩm và bọt chữa cháy [2]. Vì PFAS có cấu trúc rất bền vững, chúng rất khó tham gia các phản ứng thủy phân, phân hủy bởi ánh sáng và phân hủy sinh học nên được xếp vào nhóm các chất ô nhiễm hữu cơ khó phân hủy (POPs) [3]. PFAS được tìm thấy ở mức nồng độ cỡ phần tỉ (ppb) trong các thành phần môi trường (nước, đất, trầm tích, không khí, bụi) và sinh vật ở nhiều quốc gia trên thế giới [1-3]. Các nghiên cứu dịch tễ học đã chỉ ra mối liên hệ giữa sự phơi nhiễm PFAS và các tác động tiêu cực đến sinh vật như ảnh hưởng đến chức năng của tuyến giáp, hệ miễn dịch, gây rối loạn điều hòa lipid và insulin, các bệnh ở gan và thận, các biểu hiện bất thường ở hệ sinh sản và sự phát triển của cơ thể và có khả năng gây ung thư [4].

* Tác giả liên hệ.
Địa chỉ email: hoangquocanh1990@gmail.com

https://doi.org/10.25073/2588-1140/vnunst.5686



Hình 1. Công thức cấu tạo của PFCA và PFS.

Bụi lắng có khả năng tích lũy nhiều nhóm chất ô nhiễm hữu cơ và tiềm ẩn nguy cơ phơi nhiễm các hợp chất này trên cơ thể người thông qua những con đường như hít thở, nuốt phải và tiếp xúc qua da [5]. Nghiên cứu đầu tiên về 2 PFAS điển hình là perfluorooctane sulfonate (PFOS) và perfluorooctanoic acid (PFOA) trong mẫu bụi được thực hiện tại Nhật Bản vào những năm đầu 2000 đã cho thấy sự có mặt phổ biến của chúng trong bụi với mức hàm lượng 11–2500 ng/g PFOS và 69–3700 ng/g PFOA [6]. Sau đó, sự hiện diện của các PFAS trong bụi đã được báo cáo ở nhiều quốc gia trên thế giới như Canada [7], Thuỵ Điển [8-10], Mỹ [2, 11-14], Ấn Độ [15], Anh [16], Australia [17], Italy [18], Đài Loan [19] và Trung Quốc [20, 21]. Sự phơi nhiễm PFAS trên cơ thể người ngoài con đường tiêu thụ thực phẩm và nước uống còn được đóng góp một phần đáng kể từ sự hấp thụ bụi [22].

Thông tin về tình trạng ô nhiễm PFAS trong bụi lắng ở các nước mới và đang phát triển nhìn chung còn rất hạn chế. Hiện chưa có các nghiên cứu về mức hàm lượng và đặc trưng tích lũy PFAS trong mẫu bụi tại Việt Nam cũng như các nước Đông Nam Á. Một số nguyên nhân dẫn đến sự thiếu hụt thông tin liên quan đến PFAS là do năng lực quan trắc các hợp chất này chưa đáp ứng được yêu cầu, thiếu kinh phí nghiên cứu, các phương pháp phân tích còn phức tạp và hiểu biết, mức độ quan tâm đến vấn đề này còn chưa đầy đủ. Trong bài báo tổng quan này, phương pháp phân tích PFAS trong bụi lắng được nghiên cứu và tập hợp thông tin từ các công bố trước đây, nhằm tìm ra những nguyên tắc cơ bản và kỹ thuật cụ thể cho xác định lượng vết, siêu vết PFAS trong nền mẫu bụi. Thông tin thu thập được cùng với các so sánh, bàn luận về ưu nhược điểm, khả năng ứng dụng và hiệu quả của các phương pháp phân tích sẽ có giá trị tham khảo cho các nghiên cứu tiếp theo về sự ô nhiễm PFAS trong bụi tại Việt Nam và các nước đang phát triển.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Phương pháp thu thập thông tin

Các bài báo khoa học về phân tích và đánh giá ô nhiễm PFAS trong mẫu bụi lắng được tìm kiếm và lựa chọn theo phương pháp PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) với 3 bước cơ bản như sau: i) Phát hiện; ii) Sàng lọc; và iii) Lựa chọn. Tổ hợp từ khóa được sử dụng là “PFAS” và “settled dust”. Các cơ sở dữ liệu được sử dụng để tìm kiếm bao gồm: ACS Publications, Hindawi, MDPI, PubMed, ScienceDirect, SpringerLink, Taylor & Francis Online, và Wiley Online Library. Các bài báo được sàng lọc và lựa chọn dựa trên các tiêu chí: i) Được công bố trên các tạp chí thuộc hệ thống Web of Science/Scopus; ii) Báo cáo cụ thể về quy trình phân tích PFAS trong mẫu bụi lắng; iii) Sử dụng phương pháp phân tích là sắc ký lỏng ghép nối khối phổ (LC-MS) hoặc phương pháp khác có độ chọn lọc tương đương hoặc cao hơn; và iv) Báo cáo các thông số về đảm bảo chất lượng và kiểm soát chất lượng (QA/QC).

Tóm tắt về danh sách chất phân tích cùng với chất nội chuẩn (nếu có) của các nghiên cứu trước đây về PFAS trong mẫu bụi được trình bày trong Bảng 1. Ngoài ra, các nhóm chất PFAS khác cũng đã được nghiên cứu phân tích trong mẫu bụi, bao gồm: fluorinated sulfonamide (FOSA),

fluorinated sulfonamidoethanol (FOSE), fluorotelomer alcohol (FTOH), fluorotelomer sulfonic acid (FTSA), fluorotelomer unsaturated carboxylic acid (FTUCA), perfluoroalkyl phosphonic acid (PFPA), perfluoroalkyl phosphinic acid (PFPIA), polyfluroalkyl phosphate ester (PAP), polyfluoroalkyl phosphate diester (diPAP) và một số chất PFAS "mới nổi" (emerging PFAS) khác. Các nhóm chất PFAS mới này thường là sản phẩm chuyển hóa, tiền chất hoặc các chất thay thế cho nhóm PFAS cổ điển như PFCA và PFS. Trong bài báo tổng quan này, chúng tôi chủ yếu tập trung vào điều kiện phân tích PFCA và PFS là 2 nhóm chất PFAS cổ điển được xác định trong hầu hết các nghiên cứu trước đây về PFAS trong mẫu bụi.

Bảng 1. Danh sách các chất PFAS được nghiên cứu trong mẫu bụi

Quốc gia (năm)	Chất phân tích	Chất nội chuẩn	TLTK
Nhật Bản (2003)	PFOA, PFOS	SDS-d25	[6]
Canada (2005)	PFBS, PFHxS, PFOA, PFOS, FOSA	*2H*-perfluoro[1,2-$^{13}C_2$]-2-octenonic acid	[7]
Thụy Điển (2009)	PFOA, PFOS	$^{13}C_4$-PFOA, $^{18}O_2$-PFOS	[8]
Thụy Điển (2021)	PFCA, PFS, PFPA, PFPIA, PAP, diPAP, FTSA, FOSA	^{13}C-PFCA, ^{13}C-PFS, ^{13}C-FTSA, ^{13}C-diPAP, ^{13}C-PAP, Cl-PFPA	[9]
Thụy Điển (2022)	PFCA, PFS, FTSA, FOSA, diPAP, PFPA, PFPIA	–	[10]
Mỹ (2008)	PFCA, PFS, FTOH	$^{13}C_2$-PFOA, $^{18}O_2$-PFOS, perfluorodecylpropanol	[11]
Mỹ (2009)	PFCA, PFS, FOSA	^{13}C-PFCA, $^{18}O_2$-PFOS, ^{18}O-FOSA, D-FOSA	[12]
Mỹ (2013)	PFCA, PFS, FTOH, FOSE	–	[23]
Mỹ (2020)	PFCA, PFS, FTSA, FTOH, FOSA, FOSE	^{13}C-PFCA, ^{13}C-FTSA, ^{13}C-PFS, ^{13}C-FTOH	[13]
Mỹ (2020)	PFCA, PFS, FTS, FTOH, FOSA, FOSE	^{13}C-PFCA, ^{13}C-PFS, D-FOSE	[2]
Mỹ (2021)	PFCA, PFS, FOSA	–	[24]
Mỹ (2022)	PFCA, PFS	^{13}C-PFCA, ^{13}C-PFS	[14]
Ấn Độ (2023)	PFCA, PFS, FTSA, FOSA, FTUCA, diPAP,…	^{13}C-PFCA, ^{13}C-PFS,…	[15]
Anh (2023)	PFCA, PFS	^{13}C-PFCA, ^{13}C-PFS	[16]
Australia (2023)	PFCA, PFS, FTSA, FOSA, FOSE,…	^{13}C-PFCA, ^{13}C-PFS,…	[17]
Italy (2024)	PFOA	–	[18]
Đài Loan (2024)	PFCA, PFS	^{13}C-PFCA, ^{13}C-PFS	[19]
Trung Quốc (2020)	PFCA, PFS, FTUCA, FOSA, FTSA,…	^{13}C-PFCA, ^{13}C-FTSA, ^{13}C-PFS, ^{13}C-FTUCA	[20]
Trung Quốc (2021)	PFCA, PFS, FOSA, FTSA, diPAP,…	^{13}C-PFCA, ^{13}C-PFS,…	[21]

2.2. Phương pháp phân tích thông tin

Các bài báo được lựa chọn để đưa vào bài tổng quan này sẽ được nghiên cứu, phân tích, đánh giá và lấy thông tin, bao gồm: i) Kỹ thuật lấy mẫu và bảo quản mẫu; ii) Kỹ thuật chuẩn bị mẫu; iii) Kỹ thuật chiết mẫu; iv) Kỹ thuật xử lý dịch chiết; v) Phương pháp phân tích định lượng PFAS; và vi) Các kỹ thuật đảm bảo chất lượng và kiểm soát chất lượng (QA/QC) trong quy trình phân tích. Điều kiện của từng kỹ thuật và phương pháp được tập hợp, so sánh và đưa ra các nhận xét về ưu điểm, nhược điểm và khả năng ứng dụng. Hiệu quả của mỗi phương pháp phân tích sẽ được đánh giá dựa trên các tiêu chí về độ đúng, độ chụm, giới hạn phát hiện, mức độ đơn giản, thời gian, lượng dung môi, hóa chất sử dụng.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Kỹ thuật lấy mẫu và bảo quản mẫu

Mẫu bụi lắng chủ yếu được thu thập bằng kỹ thuật hút bụi với thiết bị hút bụi của nhóm nghiên cứu hoặc được lấy từ túi lọc bụi của máy hút bụi gia dụng có sẵn tại các địa điểm khảo sát. Túi lọc bụi thường được chế tạo từ vật liệu nylon [13, 21] hoặc cellulose [8, 14, 23]. Kích thước mắt lưới của túi lọc bụi dao động trong khoảng từ 25 µm [13, 21] đến 40 µm [9]. Mẫu bụi cũng có thể được thu thập thủ công với các dụng cụ như chổi [20] hoặc dao bằng thép không gỉ [15, 18]. Mẫu sau khi thu thập được chuyển vào túi zip polyethylene [7, 17], túi zip polyurethane [23], túi hoặc ống polypropylene [15, 19], túi plastic tối màu [10], phoi nhôm [13, 21] hoặc gói trong phoi nhôm và chuyển vào ống thủy tinh [18]. Mẫu bụi có thể được bảo quản ở nhiệt độ phòng và tránh ánh sáng [7, 10, 18] hoặc bảo quản ở nhiệt độ thấp như 4 °C [19] hay –20 °C [13, 14, 20, 23].

3.2. Kỹ thuật chuẩn bị mẫu

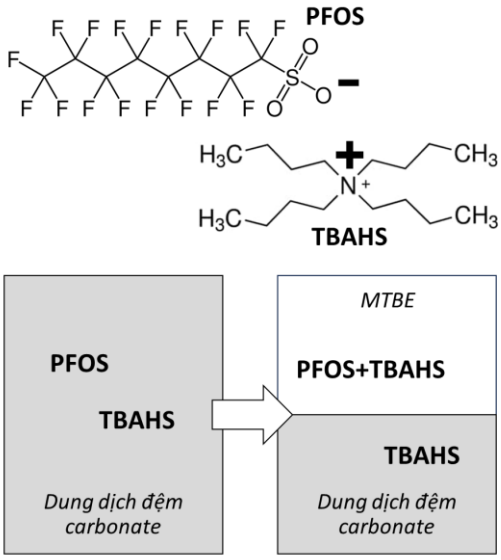
Mẫu bụi sau khi thu thập cần được chuẩn bị ở dạng đồng nhất cho phân tích hàm lượng các chất PFAS. Moriwaki và cộng sự (2003) đã sử dụng các dụng cụ đơn giản như kẹp và kính lúp để loại bỏ các dị vật có kích thước lớn như tóc và mảnh nhựa [6]. Mẫu bụi thường được rây qua sàng để lấy pha hạt có kích thước xác định. Kubwabo và cộng sự (2005) đã sử dụng máy sàng rung với 2 rây có kích thước mắt lưới lần lượt là 1,18 mm và 150 µm để thu mẫu bụi có đường kính nhỏ hơn 150 µm [7]. Sau đó, các sợi tóc trong mẫu bụi tiếp tục được loại bỏ bằng nhíp hoặc bàn chải [7]. Kích thước hạt của mẫu bụi có thể dao động từ <80 µm [17], <150 µm [7, 11, 19], <500 µm [23] đến 1 mm [9]. Mẫu được bảo quản trong các vật chứa khác nhau như ống polypropylene [19, 20] hoặc trong lọ thủy tinh tối màu [11, 23]. Nhiệt độ bảo quản mẫu nằm trong khoảng –20 °C [13, 20, 21, 23], 4 °C [19] đến nhiệt độ phòng (20–21 °C) [7, 8, 10].

3.3. Kỹ thuật chiết mẫu

Chiết mẫu là bước quan trọng của quy trình phân tích PFAS trong mẫu bụi vì hiệu quả chiết có ảnh hưởng lớn đến độ chính xác của phương pháp. Các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu quả chiết bao gồm: loại dung môi (thành phần, tỉ lệ giữa khối lượng mẫu và thể tích dung môi), kỹ thuật chiết và điều kiện chiết (nhiệt độ, áp suất, thời gian chiết, số lần chiết). Chiết siêu âm là kỹ thuật được sử dụng phổ biến nhất trong quy trình phân tích PFAS từ nền mẫu bụi. Do cấu trúc của PFAS có các nhóm chức phân cực nên các dung môi hữu cơ có độ phân cực tương đối cao thường được sử dụng để chiết các hợp chất này, ví dụ như methanol [2, 6, 8, 10, 14-16, 18, 21], hỗn hợp methanol và dung dịch acid formic 0,1 M (1:1, v/v) [12], hỗn hợp methanol và dung dịch acid acetic 1% (9:1, v/v) [19], acetonitrile [7, 11] hoặc hệ dung môi hexane/ isopropanol (4:1, v/v) và methanol/ acetonitrile (1:1, v/v) [13]. Quá trình chiết có thể được lặp lại từ hai đến bốn lần với thời gian của mỗi lần chiết dao động từ 10 đến 60 phút.

Bên cạnh kỹ thuật chiết siêu âm, kỹ thuật chiết cặp ion cũng được áp dụng trong quy trình phân tích PFAS. Nguyên tắc của kỹ thuật chiết cặp ion là tạo ra cấu tử trung hoà điện tích bao gồm ion của chất phân tích và ion đối, sau đó chiết cấu tử này vào dung môi hữu cơ kém phân cực. Zhang và cộng sự (2020) đã tiến hành chiết PFAS trong mẫu bụi với chất tạo cặp ion tetrabutylammonium hydrogen sulfate

(TBAHS) với dung môi metyl *tert*-butyl ether (MTBE) [20]. Khoảng 200 mg mẫu bụi được chuyển vào ống ly tâm 15 mL, thêm chất nội chuẩn, 1 mL TBAHS 0,5 M và 2 mL đệm sodium carbonate 0,25 M và trộn đều hỗn hợp trong 10 s. Quá trình chiết được thực hiện lặp lại 2 lần, mỗi lần 5 mL dung môi và lắc trong 40 phút. Sau mỗi lần chiết, ống chứa mẫu được ly tâm ở tốc độ 5000 ×*g* trong 10 phút. Các phần dịch chiết được gộp lại vào ống khác, cô dưới dòng khí N_2 đến gần cạn và hoà tan mẫu với 0,5 mL methanol trước khi phân tích. Cơ chế của kỹ thuật chiết cặp ion được tóm tắt trong Hình 2.



Hình 2. Cơ chế của kỹ thuật chiết cặp ion trong quy trình phân tích PFAS.

3.4. Kỹ thuật làm sạch dịch chiết mẫu

Trong quá trình chiết mẫu, hiện tượng các chất có mặt trong nền mẫu nhưng không phải là chất phân tích (các chất cản trở) bị chiết cùng với các chất phân tích là không thể tránh khỏi. Sự có mặt của các chất cản trở trong dịch chiết có thể làm tăng mức độ nhiễu nền, thậm chí ảnh hưởng đến tín hiệu của chất phân tích và gây ra sự nhiễm bẩn cho một số bộ phận trong thiết bị phân tích. Vì vậy, làm sạch dịch chiết là một bước quan trọng trong phân tích lượng vết các chất ô nhiễm hữu cơ nói chung và của quy trình phân tích PFAS trong mẫu bụi nói riêng. Bước làm sạch dịch chiết PFAS trong bụi nhìn chung đơn giản hơn so với các nhóm chất POPs khác cho phân tích bằng phương pháp sắc ký khí. Một số nghiên cứu phân tích PFAS trong bụi còn không bao gồm bước làm sạch dịch chiết mà chỉ cần lọc dịch chiết qua màng lọc để loại bỏ pha hạt [2, 6, 11, 18, 19, 24]. Bên cạnh đó, một số nghiên cứu đã sử dụng kỹ thuật chiết pha rắn (SPE) [7, 9, 14, 15, 23] hoặc chiết phân tán pha rắn (DSPE) [8, 13, 21] để làm sạch dịch chiết PFAS trong mẫu bụi.

SPE là một kỹ thuật làm sạch dịch chiết mẫu tiên tiến với nhiều ưu điểm như thao tác đơn giản và được chuẩn hóa, có thể tiến hành làm sạch đồng thời nhiều mẫu, tiết kiệm thời gian và dung môi. Quy trình SPE thường bao gồm 4 bước cơ bản: i) hoạt hóa cột; ii) nạp dịch chiết mẫu; iii) rửa tạp chất; và iv) rửa giải chất phân tích. Các chất hấp phụ đã được sử dụng để làm sạch dịch chiết PFAS là silica biến tính với nhóm chức $–Si(CH_3)_2(CH_2)_{17}CH_3$ (theo cơ chế tương tác pha đảo C18) [7] hoặc $–Si(CH_3)_2(CH_2)_3NH_2$ (theo cơ chế trao đổi anion yếu WAX) [9], carbon graphite [14] hoặc sự kết hợp của hệ 2 cột SPE carbon và WAX [15]. Điều kiện làm sạch dịch chiết PFAS bằng kỹ thuật SPE với các loại chất hấp phụ khác nhau được tóm tắt trong Bảng 2.

Bảng 2. Điều kiện làm sạch dịch chiết PFAS bằng kỹ thuật SPE

Cột SPE	Các bước tiến hành	TLTK
C18 (1 g)	Rửa cột với 5 mL acetonitrile, nạp 2 mL dịch chiết, rửa giải với 5 mL acetonitrile, cô cạn với N_2, hòa tan mẫu với 200 µL acetonitrile.	[7]
WAX (150 mg, 6 mL)	Thêm 25 mL nước vào 1,5 mL dịch chiết methanol, chỉnh pH 10, thêm 4 mL hexane, lắc 10 phút, loại bỏ hexane, chỉnh pH 4. Hoạt hóa cột, nạp mẫu, rửa tạp chất với 4 mL ammonium acetate (pH 4)	[9]

	và 8 mL tetrahydrofuran/methanol (3:1), rửa giải với 4 mL methanol chứa 0,1% NH_4OH. Cô cạn, hòa tan mẫu với 200 µL methanol/nước (1:1).	
ENVI-Carb (100 mg, 1 mL) và WAX (150 mg, 6 mL)	Cột ENVI-Carb được rửa với methanol (1 mL × 3 lần), nạp dịch chiết. Pha loãng dịch chiết methanol đến 100 mL bằng nước cất. Rửa cột WAX với 4 mL NH_3 0,1% trong methanol, 4 mL methanol và 4 mL nước, nạp dung dịch mẫu, rửa cột với 5 mL nước và 4 mL đệm acetate (pH 4), làm khô cột, rửa giải với 4 mL methanol và 4 mL NH_3 0,1% trong methanol, cô N_2 đến 1 mL.	[15]
ENVI-Carb (250 mg, 3 mL)	Rửa cột với 5 mL methanol (2 lần), nạp dịch chiết mẫu trong methanol, thu lấy dung dịch, cô đến 0,5 mL, trộn dung dịch methanol với dung dịch ammonium acetate (6:4).	[23]

Kato và cộng sự (2009) đã giới thiệu phương pháp làm sạch "on-line" ghép nối trực tiếp cột làm sạch với hệ thống phân tích LC-MS/MS [12]. Dung dịch mẫu bao gồm 100 µL dịch chiết mẫu bụi, 25 µL dung dịch chất nội chuẩn trong methanol và 300 µL dung dịch acid formic 0,1 M (tổng thể tích 425 µL) được đưa vào cột làm sạch Betasil C8 (10 mm × 3 mm × 5 µm) với dung dịch acid formic 0,1% ở tốc độ 1 mL/phút trong 1,5 phút. Cột làm sạch được rửa với hỗn hợp methanol và acid formic 0,1% (15:85, v/v) ở tốc độ 0,5 mL/phút trong 1,5 phút, sau đó tiếp tục rửa với dung dịch NH_4OH 0,3% trong nước với tốc độ 0,5 mL/phút trong 1 phút. Sau 4 phút nạp mẫu và rửa tạp chất, van mẫu được chuyển vị trí để đưa dung dịch mẫu đã làm sạch vào cột tách của hệ thống LC-MS/MS [12].

DSPE là một kỹ thuật làm sạch dịch chiết PFAS trong mẫu bụi được một số nghiên cứu áp dụng [8, 13, 21]. Trong kỹ thuật này, một lượng chất hấp phụ được thêm trực tiếp vào hỗn hợp mẫu và dung môi rồi tiến hành chiết [8] hoặc thêm vào dịch chiết cần làm sạch [13, 21]. Chất hấp phụ phổ biến được sử dụng trong kỹ thuật này là carbon graphite không có cấu trúc xốp, thường được biết đến với tên thương mại là Supelclean ENVI-Carb của hãng Supelco. Bjorklund và cs. (2009) đã tiến hành chiết và làm sạch đồng thời mẫu bụi (2–170 mg) với 10 mg Envi-Carb, chiết hỗn hợp 2 lần mỗi lần với 5 mL methanol (rung vortex 10 s và chiết siêu âm 10 phút) [8]. Wu và cộng sự (2020) đã tiến hành làm sạch dịch chiết mẫu bụi (50–100 mg bụi trong 5 mL dịch chiết) với 100 mg ENVI-Carb [13]. Xu và cộng sự (2021) đã sử dụng 20 mg ENVI-Carb và 50 µL acid acetic để làm sạch 0,5 mL dịch chiết của 20 mg bụi [21]. Quá trình làm sạch được hỗ trợ bởi một số kỹ thuật như rung vortex và ly tâm. Kỹ thuật này có ưu điểm là nhanh, đơn giản và sử dụng lượng nhỏ chất hấp phụ hơn so với kỹ thuật SPE.

3.5. Phương pháp phân tích định lượng PFAS

Phương pháp phân tích định lượng phổ biến nhất dùng để tách và xác định hỗn hợp PFAS trong nền mẫu môi trường là sắc ký lỏng ghép nối khối phổ hai lần (LC-MS/MS) theo cơ chế hấp phụ pha đảo (RP). Đây là phương pháp có độ chọn lọc, độ đặc hiệu và khả năng phát hiện ưu việt với giới hạn phát hiện thấp cỡ ppb (ng/mL) hoặc thậm chí ppt (pg/mL). Điều kiện tách và phân tích định lượng PFAS của một số nghiên cứu trước đây được tóm tắt trong Bảng 3. Cột tách pha đảo silica với nhóm chức C18 được sử dụng phổ biến nhất. Chiều dài cột dao động từ 50 mm [11, 18], 100 mm [8, 20, 21] đến 150 mm [6, 7, 19]. Đường kính trong của cột dao động từ 1 mm đến 4,6 mm. Đường kính của hạt pha tĩnh dao động từ 1,7 µm đến 5 µm. Các nghiên cứu cũng thường sử dụng thêm cột bảo vệ ở vị trí giữa cổng bơm mẫu và cột tách để duy trì tuổi thọ của cột tách [12, 15]. Cột bảo vệ thường có bản chất pha tĩnh tương tự như cột tách nhưng có chiều dài ngắn hơn, từ 10 mm [12] đến 12,5 mm [15]. Kato và cộng sự (2009)

đã sử dụng cột C8 để phân tích PFAS với cột tách Betasil C8 (50 mm × 2,1 mm × 3 µm) và cột bảo vệ (10 mm × 3 mm × 5 µm) [12]. Bên cạnh đó, Yamazaki và cs. (2023) đã sử dụng cột tách trao đổi ion RSpak JJ-50 2D (150 mm × 2 mm × 5 µm) để phân tích một số PFAS mạch ngắn (C_2 đến C_6) [15]. Các PFAS mạch ngắn có độ phân cực cao và tương tác với pha tĩnh C18 kém, dẫn đến hiệu quả tách thấp và thời gian lưu trên cột rất ngắn. Do đó, sử dụng cơ chế tách trao đổi ion là một phương pháp phù hợp để có được hiệu quả tách tốt cho các PFAS mạch ngắn [15]. Moriwaki và cộng sự (2003) đã thực hiện phân tích PFAS ở nhiệt độ 40 °C [6], tuy nhiên nhiệt độ thường không được các nghiên cứu khác đề cập do đây không phải là yếu tố ảnh hưởng nhiều đến hiệu quả tách.

Bảng 3. Điều kiện tách và phân tích định lượng PFAS trong mẫu bụi

Cột tách	Pha động	Điều kiện MS	TLTK
TSK-GEL ODS-80TsQA (150 mm × 2 mm × 5 µm)	A (1 mM ammonium acetate, pH 4), B (methanol), gradient, 0,2 mL/phút	ESI, MRM	[6]
Symmetry C18 (150 mm × 1 mm × 3,5 µm)	A (2 mM ammonium acetate trong acetonitrile/nước, 9:1), B (2 mM ammonium acetate trong acetonitrile/nước 2:9), gradient, 25 µL/phút	ESI, MRM	[7]
Ace C18 (100 mm × 2 mm × 5 µm)	A (2 mM ammonium acetate trong methanol/nước, 4:6), B (2 mM ammonium acetate trong methanol/nước 95:5), gradient, 0,2 mL/phút	ESI, SRM	[8]
Luna C18(2) (50 mm × 4,6 mm)	A (2 mM ammonium acetate), B (acetonitrile), 1:1, isocratic, 0,2 mL/phút	ESI, MRM	[11]
Betasil C8 (50 mm × 2,1 mm × 3 µm)	A (20 mM ammonium acetate, pH 4), B (acetonitrile), gradient, 0,3 mL/phút	ESI, MRM	[12]
Poroshell EC-C18 (50 mm × 3 mm × 2,7 µm)	A (4 mM ammonium acetate), B (methanol), gradient, 0,4 mL/phút	ESI, MRM	[18]
Zorbax SB-C18 (100 mm × 2,1 mm × 3,5 µm)	A (0,1% acid formic trong acetonitrile), B (0,1% acid formic trong nước), gradient, 0,3 mL/phút	ESI, MRM	[20]
Acquity UPLC BEH RP18 (100 mm × 2,1 mm × 1,7 µm)	A (5 mM ammonium acetate), B (methanol), gradient, 0,2 mL/phút	ESI, MRM	[21]

Trong cơ chế pha đảo, các PFAS được rửa giải từ cột tách với hệ 2 dung môi (kênh A và kênh B) có độ phân cực cao, ví dụ như dung dịch muối ammonium acetate, dung dịch đệm ammonium acetate/acid acetic, dung dịch acid formic, acetonitrile, methanol ở chế độ rửa giải biến đổi dòng (gradient) hoặc dòng không đổi (isocratic) (Bảng 3). Để đảm bảo hiệu quả tách và thời gian lưu phù hợp, chế độ rửa giải gradient được sử dụng phổ biến hơn chế độ isocratic. Tốc độ dòng pha động thường dao động từ 0,2 đến 0,4 mL/phút, tuy nhiên tốc độ dòng thấp hơn (25 µL/phút) cũng được sử dụng trong một nghiên cứu [7]. Thể tích mẫu được đưa vào hệ thống LC-MS/MS có thể dao động từ 2 µL [7, 20], 15 µL [18], 25 µL [8], đến 200 µL [19], và thao tác bơm mẫu thường được thực hiện bằng bộ phận bơm mẫu tự động.

Trong các nghiên cứu về phân tích PFAS bằng phương pháp LC-MS/MS, detector khối phổ thường được vận hành ở chế độ ion hóa phun điện tích âm (negative electrospray

ionization, ESI–) và quan sát đa phản ứng (multiple reaction monitoring, MRM). Trong chế độ ESI, dung dịch mẫu chứa chất phân tích được đưa qua một đầu phun mao quản áp điện thế cao và chuyển thành dạng sol khí tích điện, kéo theo sự ion hóa của chất phân tích. Quá trình ion hóa và phân mảnh của PFAS trong detector khối phổ có liên quan chặt chẽ đến cấu trúc của từng chất và do đó, tín hiệu được ghi nhận có độ chọn lọc và độ đặc hiệu rất cao. Thông thường ở chế độ MRM, tín hiệu của mỗi chất sẽ được quan sát và ghi nhận với 1 phản ứng định lượng (quantification mass transition) và ít nhất 1 phản ứng xác nhận để củng cố thêm về mặt định tính (confirmation mass transition). Ví dụ, PFOA được phân tích với 2 phản ứng đặc trưng là (413 → 369) và (413 → 169) [7]. Trong đó phân tử PFOA có M = 414, ion m/z = 413 ứng với $[M–H]^-$ là sản phẩm của quá trình deproton hóa, ion m/z = 369 ứng với $[M–COOH]^-$ và ion m/z = 169 ứng với $[C_3F_7]^+$. Trong khi đó, PFOS (M = 500) lại được phân tích với 2 phản ứng đặc trưng là (499 → 99) và (499 → 80) với các ion m/z = 499, 99 và 80 lần lượt là $[M–H]^-$, $[FSO_3]^-$ và $[SO_3]^-$. Các phản ứng đặc trưng cho mỗi chất cùng với điều kiện để phản ứng xảy ra thường được tối ưu hóa và lựa chọn tự động với phần mềm chuyên dụng của thiết bị LC-MS/MS. Các thông số quan trọng cần tối ưu bao gồm: i) Nhiệt độ nguồn ion hóa; ii) Áp suất, nhiệt độ của các dòng khí (nebulizer gas, drying gas, collision gas); iii) thế phun ion (ion spray voltage); iv) năng lượng va chạm (collision energy); và v) các giá trị thế trong MS/MS (declustering potential, entrance potential, collision cell exit potential). Ngoài chế độ MRM được sử dụng phổ biến, Bjorklund và cs. (2009) đã sử dụng chế độ quan sát chọn lọc phản ứng (selected reaction monitoring, SRM) để phân tích PFOS (m/z 499 → 80) và PFOA (m/z 413 → 369) [8].

3.6. QA/QC

Các yếu tố đảm bảo chất lượng và kiểm soát chất lượng (QA/QC) của quy trình phân tích PFAS trong mẫu bụi bao gồm: i) Kết quả phân tích mẫu trắng; ii) Độ tuyến tính, iii) Độ chụm; iv) Độ đúng; và v) Giới hạn phát hiện và giới hạn định lượng. Bảng 4 trình bày tóm tắt các thông số QA/QC của quy trình phân tích PFAS trong mẫu bụi được báo cáo bởi các nghiên cứu trước đây.

Bảng 4. Tóm tắt các thông số QA/QC của quy trình phân tích PFAS trong mẫu bụi

Yếu tố QA/QC	Phương pháp xác định	Khoảng giá trị được công bố
Mức nhiễm bẩn	Phân tích mẫu trắng	PFAS tồn tại ở mức hàm lượng không đáng kể hoặc không phát hiện được trong mẫu trắng
Độ tuyến tính	Phân tích dãy dung dịch chuẩn	Khoảng tuyến tính cỡ 10^2 đến 10^3 ở mức ppb; hệ số tương quan $R^2 > 0,99$
Độ chụm	Phân tích mẫu lặp	Độ lệch chuẩn tương đối RSD < 30% ở mức ppb
Độ đúng	Thêm chất đồng hành	Độ thu hồi của các chất chuẩn đánh dấu đồng vị nằm trong khoảng 30% đến 260%
Độ đúng	Phân tích mẫu thêm chuẩn	Độ thu hồi của các chất chuẩn không đánh dấu đồng vị nằm trong khoảng 40% đến 170%
Độ chính xác	Phân tích mẫu chuẩn SRM	Sai số tương đối từ –20% đến +60%; độ lặp lại RSD < 20%
Giới hạn phát hiện	Dựa trên độ lặp lại hoặc kết quả phân tích mẫu trắng	Dao động lớn giữa các nghiên cứu, từ < 1pg/g đến khoảng 30 ng/g mỗi chất

Mẫu trắng là loại mẫu quan trọng trong QA/QC được phân tích với mục đích kiểm soát sự nhiễm bẩn chất phân tích từ các nguồn bên ngoài mẫu nghiên cứu, ví dụ như dung môi, hóa chất, thiết bị và môi trường phòng thí nghiệm. Một số loại mẫu trắng đã được sử dụng trong các nghiên cứu trước đây bao gồm: mẫu trắng dung môi, mẫu trắng quy trình và mẫu trắng vật liệu lấy mẫu [7-9, 16, 20]. Một số nghiên cứu đã báo cáo các mẫu trắng dung môi và mẫu

trắng quy trình không chứa các PFAS [16, 20]. Bên cạnh đó, lượng vết của một số PFAS đã được tìm thấy trong các mẫu trắng và là cơ sở để xác định giới hạn phát hiện và giới hạn định lượng [8, 9]. Ragnarsdottir và cộng sự (2023) đã đưa ra cách hiệu chỉnh hàm lượng PFAS trong mẫu thực với mẫu trắng như sau: i) Nếu hàm lượng trong mẫu trắng <5% so với mẫu thực thì không cần hiệu chỉnh; và ii) Nếu hàm lượng trong mẫu trắng nằm trong khoảng từ 5% đến 20% so với mẫu thực thì cần phải hiệu chỉnh với kết quả mẫu trắng [16].

Độ tuyến tính phản ánh mối quan hệ tuyến tính giữa tín hiệu đo và nồng độ chất phân tích, là cơ sở để định lượng chất. Độ tuyến tính thường được đánh giá thông qua giới hạn tuyến tính, khoảng nồng độ tuyến tính và hệ số hồi quy (R^2). Moriwaki và cộng sự (2003) đã khảo sát độ tuyến tính của PFOS và PFOA trong các dung dịch chuẩn có khoảng nồng độ từ 1 đến 200 ng/mL với độ tuyến tính tốt (R^2 > 0,99) [6]. Các kết quả tương tự (R^2 > 0,99) cũng được báo cáo cho các PFAS trong khoảng nồng độ từ 0,10 đến 100 ng/mL [20], từ 25 đến 1000 ng/g [7] và từ 10 đến 2000 ng/g [8].

Độ lặp lại (hay còn gọi là độ chụm) của phương pháp được xác định thông qua độ lệch chuẩn tương đối (RSD) của kết quả phân tích các mẫu lặp. Độ lặp lại cho phép sẽ phụ thuộc vào đối tượng phân tích, loại mẫu, phương pháp phân tích và mức hàm lượng cụ thể. Moriwaki và cộng sự (2003) đã tiến hành xác định độ lặp lại trên mẫu thêm chuẩn ở mức 100 ng (n = 3) và báo cáo giá trị RSD đối với PSOS và PFOA đều là 11% [6]. Trong một nghiên cứu khác, RSD của PFBS, PFOA và PFOS với mức thêm chuẩn 200 ng/g (n = 5) lần lượt là 1,7%, 5,0% và 1,8% [7]. Một số nghiên cứu đã báo cáo khoảng giá trị RSD rộng hơn, ví dụ < 20% [20] hoặc < 25% [13].

Độ đúng là một trong những yếu tố quan trọng nhất của phương pháp phân tích nói chung và thường được đánh giá thông qua độ thu hồi của các chất phân tích trên mẫu thêm chuẩn, độ thu hồi của các chất đồng hành và kết quả phân tích các mẫu chuẩn (CRM hoặc SRM). Moriwaki và cộng sự (2003) đã tiến hành thí nghiệm xác định độ thu hồi của PFOS và PFOA trên nền mẫu bụi ở mức 100 ng và báo cáo độ thu hồi trung bình của mỗi chất lần lượt là 89% và 73% [6]. Kubwabo và cộng sự (2005) đã báo cáo độ thu hồi trung bình của các chất PFBS, PFOS và PFOA lần lượt là 92,9%, 88,3% và 100,7% ở mức thêm chuẩn là 200 ng/g [7]. Strynar và cộng sự (2008) đã đạt được độ thu hồi 100 ± 20% cho hầu hết PFAS trừ một số chất như PFNA (39,5%) và PFHxS (44,2%) [11]. Ở một nghiên cứu khác, độ thu hồi của PFAS trong mẫu bụi thêm chuẩn dao động từ 85% ± 12% (PFBS) đến 123% ± 19% (PFUnDA) [20]. Độ thu hồi từ 54% đến 169% của các PFAS trên mẫu bụi thêm chuẩn đã được báo cáo bởi Wu và cộng sự (2020) [13]. Nhìn chung, độ thu hồi của PFAS trong mẫu bụi thêm chuẩn dao động với khoảng giá trị tương đối rộng (40% đến 170%) cho thấy đây là nhóm chất đòi hỏi năng lực phân tích cao để đảm bảo được độ đúng.

Trong quy trình phân tích PFAS ở mức hàm lượng vết hoặc siêu vết, hàm lượng của các chất này thường được xác định bằng phương pháp nội chuẩn/pha loãng đồng vị với các chất chuẩn đánh dấu đồng vị bền như ^{13}C hoặc ^{2}H (deuterium). Các chất chuẩn đánh dấu đồng vị này được thêm vào mẫu trước khi phân tích và trải qua tất cả các công đoạn của quy trình nên còn được gọi là chất đồng hành. Tín hiệu của chất đồng hành có hai vai trò: i) Xác định độ thu hồi của quy trình; và ii) Xác định hàm lượng của chất phân tích theo phương pháp nội chuẩn. Wu và cộng sự (2020) đã báo cáo độ thu hồi của các chất đồng hành của PFBA, PFBS, PFHxA, PFHxS, PFOA và PFOS lần lượt là 87 ± 12%, 83 ± 12%, 84 ± 22%, 83 ± 5,2%, 87 ± 4,5% và 93 ± 6,1% [13]. Độ thu hồi trung bình của $^{13}C_4$-PFOS và $^{13}C_8$-PFOA lần lượt là 98,6% (91−108%) và 101,7% (83−147%) [17]. Khoảng độ thu hồi của các chất đánh dấu đồng vị dao động từ 60% đến 123% [15] và từ 32% đến 259% [9]. Mặc dù độ thu hồi của các chất đồng hành có thể sai lệch lớn (so với giá trị 100%), nhưng kết quả phân tích PFAS vẫn có độ chính xác cao nhờ ưu điểm của phương pháp định lượng bằng nội chuẩn.

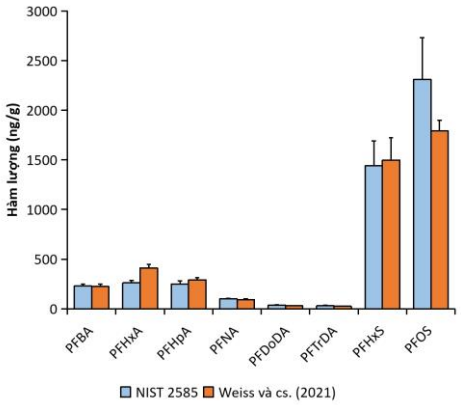
Đánh giá độ chính xác của phương pháp phân tích dựa trên kết quả của mẫu chuẩn được chứng nhận (standard reference material, SRM) là một bước quan trọng trong QA/QC. Viện Tiêu chuẩn và Công nghệ Quốc gia Hoa Kỳ (National Institute of Standards and Technology, NIST) đã sản xuất và ban hành mẫu chuẩn SRM 2585 Organic Contaminants in House Dust cho mục đích đánh giá phương pháp phân tích các chất ô nhiễm hữu cơ trong nền mẫu bụi, trong đó có hàm lượng tham khảo cho 6 chất PFCA và 2 PFS (Bảng 5).

Bảng 5. Hàm lượng tham khảo của các PFAS trong mẫu chuẩn SRM 2585

Chất	Hàm lượng (ng/g)
Perfluorobutanoic acid	230 ± 16
Perfluorohexanoic acid	260 ± 25
Perfluoroheptanoic acid	249 ± 32
Perfuorononanoic acid	99.4 ± 4.9
Perfluorododecanoic acid	34.6 ± 4.5
Perfluorotridecanoic acid	29.4 ± 4.6
Perfluorohexanesulfonic acid	1440 ± 250
Perfluorooctanesulfonic acid	2310 ± 420

Weiss và cộng sự (2021) đã phân tích mẫu chuẩn SRM 2585 (n = 8) để đánh giá độ chính xác của phương pháp phân tích PFAS trong mẫu bụi (Hình 3). Kết quả phân tích cho thấy phương pháp có độ đúng (78% đến 158%) và độ lặp lại (RSD ≤ 15%) tương đối tốt [9]. Schildroth và cộng sự (2022) cũng báo cáo sai số tương đối của giá trị đo được và giá trị tham khảo nhỏ hơn 20% cho hầu hết PFAS (trừ PFHxA) khi phân tích mẫu chuẩn SRM 2585 (n = 3) [14].

Giới hạn phát hiện (MDL) và giới hạn định lượng (MQL) là các thông số quan trọng của QA/QC thể hiện khả năng phát hiện và định lượng các chất ở mức nồng độ thấp. Giá trị MDL và MQL được xác định bằng nhiều cách khác nhau trong các nghiên cứu trước đây. Kubwabo và cộng sự (2005) đã xác định MQL bằng 10 lần độ lệch chuẩn của kết quả phân tích lặp lại (n = 7) với các giá trị cho PFBS, PFOA và PFOS lần lượt là 4,39; 7,29 và 14,51 ng/g [7]. Wu và cộng sự (2020) đã xác định MDL bằng trung bình mức hàm lượng trong mẫu trắng cộng với 3 lần độ lệch chuẩn (n = 6) [13].



Hình 3. Kết quả phân tích PFAS trong mẫu bụi chuẩn SRM 2585 (Weiss và cộng sự 2021) và hàm lượng tham khảo theo NIST.

Weiss và cộng sự (2021) sử dụng phương pháp tương tự để xác định MQL (trung bình mức hàm lượng trong mẫu trắng cộng với 3 lần độ lệch chuẩn), với các giá trị MQL dao động từ 0,01 đến 31 ng/g [9]. Schildroth và cộng sự (2022) đã ước tính MQL bằng 3 lần độ lệch chuẩn của hàm lượng trong mẫu trắng chia cho khối lượng mẫu bụi và thu được giá trị 20 ng/g [14]. Các giá trị MQL thấp hơn đáng kể (0,58 đến 66,5 pg/g) đã được báo cáo bởi Yamazaki và cộng sự (2023), tuy nhiên cách xác định không được trình bày cụ thể [15].

4. Kết luận

Bụi lắng là một môi trường tích lũy điển hình các chất ô nhiễm hữu cơ, tuy nhiên các nghiên cứu về sự tồn tại và đặc trưng tích lũy của PFAS trong bụi lắng nhìn chung ít hơn so với các nhóm chất ô nhiễm hữu cơ khác, đặc biệt ở các nước mới và đang phát triển. Nhằm đưa ra những nguyên tắc cơ bản trong quy trình phân tích PFAS từ nền mẫu bụi, nghiên cứu tổng quan này tập hợp thông tin liên quan đến phương pháp định lượng PFAS trong bụi lắng

được công bố trên các tạp chí khoa học quốc tế uy tín trong giai đoạn 2003-2023. Quy trình phân tích PFAS trong bụi bao gồm các bước cơ bản như: i) Thu thập và chuẩn bị mẫu; ii) Chiết mẫu với dung môi phân cực sử dụng kĩ thuật chiết siêu âm, hoặc chiết tạo cặp ion với tác nhân cation và dung môi kém phân cực; iii) Loại bỏ tạp chất với kĩ thuật chiết pha rắn hoặc chiết phân tán pha rắn; và iv) Tách và phân tích định lượng trên hệ thống sắc ký lỏng ghép nối khối phổ. Đảm bảo chất lượng và kiểm soát chất lượng (QA/QC) của quy trình phân tích PFAS trong mẫu bụi nhìn chung tuân theo các quy định đối với phân tích lượng vết chất ô nhiễm hữu cơ trong nền mẫu môi trường với các yếu tố cơ bản như: i) Phân tích mẫu trắng; ii) Độ tuyến tính; iii) Độ chụm; iv) Độ đúng; và v) Giới hạn phát hiện và giới hạn định lượng. Các nghiên cứu tiếp theo về mức độ ô nhiễm, đặc trưng tích lũy, dự đoán nguồn phát thải và đánh giá rủi ro liên quan đến PFAS trong mẫu bụi là rất cần thiết.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số 104.04-2023.25.

Tài liệu tham khảo

[1] P. de Voogt, M. Sáez, Analytical Chemistry of Perfluoroalkylated Substances, Trends Anal, Chem., Vol. 25, 2006, pp. 326-342, https://doi.org/10.1016/j.trac.2005.10.008.

[2] G. Zheng, B. E. Boor, E. Schreder, A. Salamova, Indoor Exposure to Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in the Childcare Environment, Environ, Pollut., Vol. 258, 2020, pp. 113714, https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113714.

[3] C. Schiavone, C. Portesi, PFAS: A Review of the State of the Art, from Legislation to Analytical Approaches and Toxicological Aspects for Assessing Contamination in Food and Environment and Related Risks Contamination in Food and Environment and Related Risks, Appl. Sci., Vol. 13, 2023, pp. 6696, https://doi.org/10.3390/app13116696.

[4] S. E. Fenton, A. Ducatman, A. Boobis, J. C. DeWitt, C. Lau, C. Ng, J. S. Smith, S. M. Roberts, Per- and Polyfluoroalkyl Substance Toxicity and Human Health Review: Current State of Knowledge and Strategies for Informing Future Research, Environ. Toxicol. Chem., Vol. 40, 2021, pp. 606-630, https://doi.org/10.1002/etc.4890.

[5] L. Lucattini, G. Poma, A. Covaci, J. de Boer, M. H. Lamoree, P. E. G. Leonards, A Review of Semi-volatile Organic Compounds (SVOCs) in the Indoor Environment: Occurrence in Consumer Products, Indoor Air and Dust, Chemosphere, Vol. 201, 2018, pp. 466-482, https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.02.161.

[6] H. Moriwaki, Y. Takata, R. Arakawa, Concentrations of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) and Perfluorooctanoic Acid (PFOA) in Vacuum Cleaner Dust Collected in Japanese Homes, J. Environ. Monit., Vol. 5, 2003, pp. 753-757, https://doi.org/10.1039/b307147m.

[7] C. Kubwabo, B. Stewart, J. Zhu, L. Marro, Occurrence of Perfluorosulfonates and Other Perfluorochemicals in Dust From Selected Homes in the City of Ottawa, Canada, J. Environ. Monit., Vol. 7, 2005, pp. 1074-1078, http://dx.doi.org/10.1039/b507731c.

[8] J. A. Björklund, K. Thuresson, C. A. de Wit, Perfluoroalkyl Compounds (PFCs) in Indoor Dust: Concentrations, Human Exposure Estimates, and Sources, Environ. Sci. Technol., Vol. 43, 2009, pp. 2276-2281, https://doi.org/10.1021/es803201a.

[9] J. M. Weiss, B. Jones, J. Koekkoek, A. Bignert, M. H. Lamoree, Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs) in Swedish Household Dust and Exposure of Pet Cats, Environ. Sci. Pollut. Res., Vol. 28, 2021, pp. 39001-39013, https://doi.org/10.1007/s11356-021-13343-5.

[10] Å. Gustafsson, Å. Bergman, J. M. Weiss, Estimated Daily Intake of Per- and Polyfluoroalkyl Substances Related to Different Particle Size Fractions of House Dust, Chemosphere, Vol. 303, 2022, pp. 135061, https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135061.

[11] M. J. Strynar, A. B. Lindstrom, Perfluorinated Compounds in House Dust From Ohio and North Carolina, USA, Environ. Sci. Technol., Vol. 42, 2008, pp. 3751-3756, https://doi.org/10.1021/es7032058.

[12] K Kato, A. M. Calafat, L. L. Needham, Polyfluoroalkyl Chemicals in House Dust, Environ. Res., Vol. 109, 2009, pp. 518-523, https://doi.org/10.1016/j.envres.2009.01.005.

[13] Y. Wu, K. Romanak, T. Bruton, A. Blum, M. Venier, Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Paired Dust and Carpets from Childcare Centers, Chemosphere, Vol. 251, 2020, pp. 126771, https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126771.

[14] S. Schildroth, K. M. Rodgers, M. Strynar, J. McCord, G. Poma, A. Covaci, R. E. Dodson, Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) and Persistent Chemical Mixtures in Dust from U.S. Colleges, Environ. Res., Vol. 206, 2022, pp. 112530,

https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112530.

[15] E. Yamazaki, D. Lawani, Y. Ruan, S. Taniyasu, N. Hanari, N. J.I. Kumar, P. K.S. Lam, N. Yamashita, Nationwide Distribution of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in Road Dust from India, Sci. Total Environ., Vol. 892, 2023, pp. 164538,

http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164538.

[16] O. Ragnarsdóttir, M. A. E. Abdallah, S. Harrad, Dermal Bioaccessibility of Perfluoroalkyl Substances from Household Dust; Influence of Topically Applied Cosmetics, Environ. Res., Vol. 238, 2023, pp. 117093,

https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117093.

[17] A. L. Juhasz, A. Keith, R. Jones, F. Kastury, Impact of Precursors and Bioaccessibility on Childhood PFAS Exposure from House Dust, Sci. Total Environ., Vol. 889, 2023, pp. 164306, http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164306.

[18] S. Barreca, M. M. M. Mancuso, D. Sacristán, A. Pace, D. Savoca, S. Orecchio, Determination of Perfluorooctanoic Acid (PFOA) in the Indoor Dust Matter of the Sicily (Italy) Area: Analysis and Exposure Evaluations, Toxics, Vol 12, 2024, pp. 28, https://doi.org/10.3390/toxics12010028.

[19] Y. Biao, J. Xu, W. R. Chen, Factors Affecting the Occurrence and Accumulation of Perfluoroalkyl Acids in Indoor Dust in Tainan, Taiwan, Chemosphere, Vol. 349, 2024, pp. 140882, https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140882.

[20] B. Zhang, Y. He, Y. Huang, D. Hong, Y. Yao, L. Wang, W. Sun, B. Yang, X. Huang, S. Song, X. Bai, Y. Guo, T. Zhang, H. Sun, Novel and Legacy Poly- and Perfluoroalkyl Substances (PFASs) in Indoor Dust from Urban, Industrial, and E-waste Dismantling Areas: The Emergence of PFAS Alternatives in China, Environ. Pollut., Vol. 263, 2020, pp. 114461,

https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114461.

[21] F. Xu, D. Chen, X. Liu, Q. Guan, H. Tan, D. Zhou, Y. Shi, J. Liu, Y. Hu, Emerging and Legacy Per- and Polyfluoroalkyl Substances in House Dust from South China: Contamination Status and Human Exposure Assessment, Environ. Res., Vol. 192, 2021, pp. 110243, https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110243.

[22] N. M. DeLuca, J. M. Minucci, A. Mullikin, R. Slover, E. A. C. Hubal, Human Exposure Pathways to Poly- and Perfluoroalkyl Substances (PFAS) from Indoor Media: A Systematic Review, Environ. Int., Vol. 162, 2022, pp. 107149,

https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107149.

[23] A. J. Fraser, T. F. Webster, D. J. Watkins, M. J. Strynar, K. Kato, A. M. Calafat, V. M. Vieira, M. D. McClean, Polyfluorinated Compounds in Dust from Homes, Offices, and Vehicles as Predictors of Concentrations Office Workers' Serum, Environ. Int., Vol. 60, 2013, pp. 128-136, http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2013.08.012.

[24] A. S. Young, R. Hauser, T. M. James-Todd, B. A. Coull, H. Zhu, K. Kannan, A. J. Specht, M. S. Bliss, J. G. Allen, Impact of "Healthier" Materials Interventions on Dust Concentrations of Per- and Polyfluoroalkyl Substances, Polybrominated Diphenyl Ethers, and Organophosphate Esters, Environ. Int., Vol. 150, 2021, pp. 106151, https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106151.