



Original Article

Development and Validation of a Rapid Analytical Method for Polybrominated Diphenyl Ethers in House Dust

Hoang Quoc Anh^{1,*}, Pham Dang Minh¹, Tran Cong Quyet¹,
Tran Manh Tri¹, Tu Binh Minh¹, Shin Takahashi^{1,2}

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

²Ehime University, 3-5-7 Tarumi, Matsuyama, Ehime, Japan

Received 01 June 2022

Revised 23 August 2022; Accepted 25 August 2022

Abstract: In this study, a rapid analytical method was developed and validated for the determination of polybrominated diphenyl ethers PBDEs in house dust samples. The dust sample was solvent extracted by using a focused ultrasonic processor with the reduced extraction time (total 30 min/sample) and solvent volume (about 30 mL/sample). The crude extract was purified by passing through a self-packed multilayer column containing 44% sulfuric acid impregnated silica gel, Florisil, and anhydrous sodium sulfate. PBDEs were eluted from the clean-up column by the mixture of dichloromethane in hexane (1:3,...). PBDEs (41 mono- to deca-BDE congeners) were analyzed by using gas chromatography/mass spectrometry (GC/MS) with negative chemical ionization (NCI) and selected ion monitoring (SIM) mode. The analytical method was validated using procedural blank, matrix-spike, and standard reference material (SRM) samples. Recoveries of PBDEs in spiked samples ranged from 65% to 120%. Analytical results of the SRM 2585 (Organic Contaminants in House Dust, National Institute of Standards and Technology, USA) indicate method accuracy with ratios of measured to certified values of almost compounds ranging from 76% to 110%. All the experiments were conducted in duplicate, showing acceptable repeatability (RSD < 15%). This method can apply to the simultaneous determination of mono- to deca-BDE congeners in dust samples at ppb to ppm levels with several advantages such as simple, rapid, accurate, cost-effective, and reducing amounts of chemicals and solvents.

Keywords: Brominated flame retardants, polybrominated diphenyl ethers, house dust, NIST SRM 2585.

* Corresponding author.

E-mail address: hoangquocanh1990@gmail.com

<https://doi.org/10.25073/2588-1140/vnunst.5485>

Phát triển và thẩm định phương pháp phân tích nhanh polybrominated diphenyl ethers trong mẫu bụi

Hoàng Quốc Anh^{1,*}, Phạm Đăng Minh¹, Trần Công Quyết¹,
Trần Mạnh Trí¹, Từ Bình Minh¹, Shin Takahashi^{1,2}

¹Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội,
19 Lê Thánh Tông, Hoàn Kiếm, Hà Nội, Việt Nam

²Đại học Ehime, 3-5-7 Tarumi, Matsuyama, Ehime, Nhật Bản

Nhận ngày 01 tháng 6 năm 2022

Chỉnh sửa ngày 23 tháng 8 năm 2022; Chấp nhận đăng ngày 25 tháng 8 năm 2022

Tóm tắt: Trong nghiên cứu này, một phương pháp phân tích nhanh các polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) trong mẫu bụi trong nhà được phát triển và thẩm định. Mẫu bụi được chiết với dung môi hữu cơ bằng bộ chiết siêu âm trực tiếp với thời gian chiết ngắn (khoảng 30 min/mẫu) và tổn lượng nhỏ dung môi (khoảng 30 mL/mẫu). Dịch chiết mẫu bụi được làm sạch qua cột đa lớp tự chuẩn bị tại phòng thí nghiệm, bao gồm silica gel tẩm 44% acid sulfuric, Florisil và sodium sulfate khan. PBDEs được rửa giải khỏi cột làm sạch bằng hỗn hợp dichloromethane trong hexane (1:3,...). PBDEs (41 đồng loại từ mono- đến deca-BDE) được phân tích bằng hệ thống sắc ký khí ghép nối khối phổ (GC/MS) ở chế độ ion hóa hóa học âm (NCI) và quan sát chọn lọc ion (SIM). Phương pháp phân tích được thẩm định bằng các mẫu trắng, nền mẫu bụi thêm chuẩn và mẫu chuẩn (SRM). Độ thu hồi của PBDEs trong các mẫu thêm chuẩn dao động từ 65% đến 120%. Kết quả phân tích mẫu chuẩn SRM 2585 (Organic Contaminants in House Dust, National Institute of Standards and Technology, USA) phản ánh độ chính xác của phương pháp với tỉ lệ giá trị đo được và giá trị chứng nhận nằm trong khoảng 76% đến 110%. Tất cả các thí nghiệm được tiến hành lặp 2 lần, cho thấy độ lặp lại chấp nhận được (RSD < 15%). Phương pháp này có thể được áp dụng để xác định đồng thời các nhóm đồng phân mono- đến deca-BDE trong mẫu bụi ở mức nồng độ cỡ ppb đến ppm với các ưu điểm như đơn giản, nhanh, chính xác, tiết kiệm và giảm lượng hóa chất, dung môi.

Từ khóa: Brominated flame retardants, polybrominated diphenyl ethers, house dust, NIST SRM 2585.

1. Mở đầu

Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) là nhóm các chất chống cháy brom hữu cơ được sản xuất và sử dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực công nghiệp, điển hình là công nghiệp điện, điện tử, giao thông vận tải, xây dựng [1]. PBDEs là loại chất chống cháy phụ gia, được thêm vào các vật liệu polymer để làm giảm khả năng bắt cháy của vật liệu. Vì các chất này chỉ được phối trộn vào vật liệu mà không thông qua

các phản ứng hóa học tạo liên kết, chúng có thể phát tán vào môi trường xung quanh thông qua quá trình bay hơi hoặc bởi sự mài mòn vật liệu [2]. PBDEs đã trở thành các chất ô nhiễm điển hình trong môi trường tự nhiên cũng như trong không gian sống và làm việc của con người [3]. Các hỗn hợp PBDEs thương mại (penta-, octa- và deca-BDE) đã được liệt kê trong Phụ lục A (các hóa chất cần loại bỏ) của Công ước Stockholm về các chất ô nhiễm hữu cơ khó phân hủy (POPs).

Năm 2010, Cục Bảo vệ Môi trường Hoa Kỳ (US EPA) đã ban hành Phương pháp tiêu chuẩn 1614A cho phân tích PBDEs trong các mẫu môi trường và sinh học (Method 1614A Brominated

* Tác giả liên hệ.

Địa chỉ email: hoanguocanh1990@gmail.com

<https://doi.org/10.25073/2588-1140/vnunst.5485>

Diphenyl Ethers in Water, Soil, Sediment, and Tissue by HRGC/HRMS). Phương pháp này khuyến cáo kỹ thuật chiết cho mẫu rắn là hệ Soxhlet/Dean-Stark. Đây là kỹ thuật chiết cổ điển với hiệu quả chiết cao, nhưng cần lượng dung môi lớn (khoảng 300 mL dung môi/mẫu) và thời gian chiết lâu (18 đến 24 h) và thao tác chuẩn bị tương đối phức tạp. Hơn nữa, Phương pháp 1614A không có hướng dẫn cụ thể cho mẫu bụi, một thành phần môi trường quan trọng tiếp nhận PBDEs trong phạm vi gần so với nguồn phát thải.

Trong nghiên cứu này, chúng tôi tiến hành phát triển và thẩm định phương pháp phân tích nhanh, đơn giản và hiệu quả cho PBDEs trong mẫu bụi. Phương pháp chiết được lựa chọn là chiết siêu âm trực tiếp dùng sừng phát siêu âm với ưu điểm nổi bật về hiệu quả chiết cao, thời gian chiết ngắn và tốn ít dung môi. Phương pháp phân tích được thẩm định dựa trên kết quả phân tích mẫu trắng, mẫu thêm chuẩn, mẫu chuẩn và mẫu lặp. Quy trình phân tích đã thẩm định được áp dụng để phân tích PBDEs ở mức hàm lượng ppb đến ppm trong một số mẫu bụi trong nhà thu thập tại khu vực đô thị ở Hà Nội. Hàm lượng PBDEs trong các mẫu bụi được xác định bằng phương pháp sắc ký khí khối phổ (GC/MS) với ưu điểm nổi bật về khả năng tách cao, độ chọn lọc cao và giới hạn phát hiện thấp, cho phép phân tích chính xác lượng vết và siêu vết nhóm chất gồm nhiều cấu tử có tính chất rất giống nhau trong nền mẫu môi trường phức tạp.

2. Thực nghiệm

2.1. Hóa chất, thiết bị

Hỗn hợp dung dịch chuẩn PBDEs (gồm 41 đồng loại bao gồm BDE-1, 2, 3, 7, 10, 15, 17, 28, 30, 47, 49, 66, 71, 77, 85, 99, 100, 119, 126, 138, 139, 140, 153, 154, 156, 169, 171, 180, 183, 184, 191, 196, 197, 201, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 209) và chất chuẩn đánh dấu đồng vị $^{13}\text{C}_{12}$ -BDE-209 được cung cấp bởi Wellington Laboratories (Canada). Các chất chuẩn đánh dấu flo bao gồm FBDE-15, 99, 154, 183, 208 được cung cấp bởi AccuStandard (USA). Các dung dịch chuẩn được chuẩn bị trong dung môi nonane.

Các dung môi và hóa chất tinh khiết phân tích bao gồm acetone, hexane, dichloromethane (DCM), sodium sulfate khan, Florisil và silica gel tẩm 44% acid sulfuric được cung cấp bởi Wako Pure Chemical Industries, Ltd. (Nhật Bản). Acetone và hexane được chưng cất lại trong bộ cất bằng thủy tinh trước khi sử dụng. Sodium sulfate được nung ở 400 °C trong ít nhất 2 h. Florisil được sấy ở 130 °C trong 3 h.

Mẫu bụi được chiết bằng thiết bị phát siêu âm VCX 130 (130 W, 20 kHz, Sonic và Materials, Inc., USA). PBDEs được phân tích trên thiết bị sắc ký khí ghép nối khối phổ GCMS-QP2010 Ultra (Shimadzu, Nhật Bản) với cột tách DB-5ht (15 m × 0,25 mm × 0,1 μm, Agilent Technologies, USA).

2.2. Mẫu phân tích

Các mẫu phân tích trong nghiên cứu này bao gồm: i) Mẫu trắng; ii) Nền mẫu bụi đại diện không thêm chuẩn; iii) Nền mẫu bụi đại diện thêm chuẩn; iv) Mẫu chuẩn SRM 2585; v) Mẫu bụi thực tế. Mẫu trắng được chuẩn bị từ sodium sulfate khan. Nền mẫu bụi đại diện được trộn từ khoảng 20 mẫu bụi thu thập ở Hà Nội và một số tỉnh miền Bắc từ tháng 8 đến tháng 9 năm 2016, sau đó sàng qua rây 100 μm để đồng nhất. Mẫu bụi thêm chuẩn được thêm lượng chất chuẩn PBDEs với lượng tuyệt đối dao động từ 0.8 đến 8.0 ng/mẫu. Mẫu chuẩn SRM 2585 (Organic Contaminants in House Dust, National Institute of Standards and Technology, USA) được cung cấp bởi Viện Tiêu chuẩn và Công nghệ Quốc gia Hoa Kỳ với giá trị nồng độ chứng nhận cho BDE-17, 28/33, 47, 49, 85, 99, 100, 138, 153, 154, 155, 183, 203, 206 và 209. Một số mẫu bụi thực tế ($n = 5$) được thu thập trong các nhà dân ở Hà Nội tháng 9 đến tháng 11 năm 2019. Ngoại trừ các mẫu bụi thực tế, các mẫu thẩm định phương pháp đều được phân tích lặp 2 lần để đánh giá độ ổn định của phương pháp.

2.3. Quy trình xử lý mẫu

Quy trình xử lý mẫu được tham khảo từ một số nghiên cứu trước đây cho nền mẫu bụi [4, 5]. Khoảng 1 g mẫu (0,2 g đối với mẫu chuẩn SRM 2585) được cân trong ống thủy tinh 50 mL và

thêm chuẩn hỗn hợp chất đồng hành (FBDE-15, 99, 183, 208 và $^{13}\text{C}_{12}$ -BDE-209). Mẫu được chiết 2 lần, lần 1 với 10 mL acetone, lần 2 với 10 mL hỗn hợp acetone/hexane (1:1,...). Mỗi lần chiết trong 10 min, sau đó ống mẫu được li tâm với tốc độ 3000 rpm trong 10 min. Các phần dịch chiết được gộp lại, cô quay chân không và chuyển hoàn toàn dung môi thành 2 mL hexane trước khi làm sạch trên cột đa lớp.

Kỹ thuật làm sạch dịch chiết mẫu nhìn chung tuân theo nguyên tắc của phương pháp phân tích POPs. Cột đa lớp thủy tinh (đường kính trong 1 cm) được chuẩn bị với các lớp hóa chất lần lượt (từ dưới lên trên) như sau: bông thủy tinh; 0,5 g sodium sulfate; 1 g silica gel tẩm 44% acid sulfuric; 0,5 g sodium sulfate; 1 g Florisil và 0,5 g sodium sulfate. Cột đa lớp được rửa bằng 20 mL hexane trước khi nạp dịch chiết mẫu. PBDEs được rửa giải bằng 20 mL hỗn hợp dung môi DCM/hexane (1:3,...). Dịch rửa giải sau đó được cô đặc, thêm chất nội chuẩn FBDE-154 và chuyển vào 100 μL nonane. Dung dịch phân tích (1 μL) được tiêm vào hệ thống GC/MS để tách và định lượng các PBDEs.

2.4. Phân tích định lượng trên GC/MS

Khí mang là helium với tốc độ dòng 1 mL/min. Nhiệt độ cổng bơm mẫu là 260 °C. Chương trình nhiệt độ của lò cột như sau: 135 °C (giữ 1 min), đến 215 °C (10 °C/min), đến 275 °C (5 °C/min), đến 295 °C (20 °C/min, giữ 0,5 min), đến 310 °C (20 °C/min, giữ 4 min). Bộ phận khối phổ được vận hành ở chế độ ion hóa hóa học âm (NCI) với khí phản ứng là methane. Nhiệt độ của bộ phận ghép nối GC/MS và nguồn ion lần lượt là 310 °C và 250 °C. Tín hiệu khối được ghi nhận ở chế độ quan sát chọn lọc ion (SIM) với $m/z = 79,0; 81,0; 158,8; 160,8; 406,6; 408,6; 486,5; 488,5; 496,6; 498,5$. Sắc đồ của dung dịch chuẩn PBDEs thu được gồm 40 peak, trong đó có 1 cặp chất trùng thời gian lưu là BDE-156/169. Lượng tuyệt đối và hàm lượng PBDEs được tính theo phương pháp nội chuẩn.

3. Kết quả và thảo luận

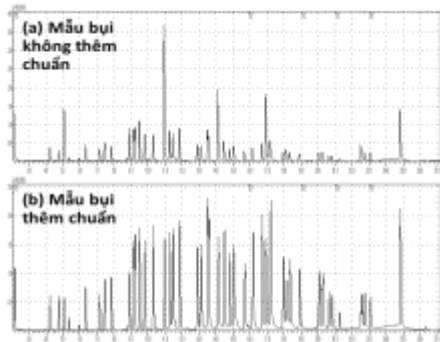
3.1. Kết quả phân tích mẫu trắng và giới hạn phát hiện của phương pháp

PBDEs là nhóm chất ô nhiễm phổ biến trong môi trường do sự có mặt của chúng trong nhiều vật liệu và sản phẩm. Trong môi trường phòng thí nghiệm, PBDEs từ nhiều nguồn khác nhau như không khí, bụi, dụng cụ thí nghiệm, thiết bị điện tử có thể gây nhiễm bẩn cho mẫu phân tích, là nguyên nhân chính gây ra sai số dương. Đặc biệt đối với các mẫu có hàm lượng PBDEs thấp thì vấn đề nhiễm bẩn và việc hiệu chỉnh kết quả đo vớ mức hàm lượng PBDEs trong mẫu trắng là rất cần thiết. Trong nghiên cứu này, mẫu trắng (sodium sulfate khan) được phân tích để kiểm tra sự nhiễm bẩn PBDEs trong môi trường phòng thí nghiệm. Với các biện pháp như chung cất lại dung môi, nung hoặc sấy hóa chất ở nhiệt độ cao, rửa dụng cụ thủy tinh bằng quy trình nghiêm ngặt, chỉ một số ít chất phân tích đã được phát hiện ở mức hàm lượng tương đối thấp. Cụ thể, 6 chất được phát hiện trong mẫu trắng bao gồm: BDE-28 ($0,0030 \pm 0,0020$), BDE-47 ($0,0050 \pm 0,0030$), BDE-138 ($0,0030 \pm 0,0020$), BDE-206 ($0,0060 \pm 0,0020$), BDE-207 ($0,0080 \pm 0,0030$) và BDE-209 ($0,10 \pm 0,050$). Giới hạn phát hiện của phương pháp (MDL) đối với 6 chất này được tính theo hàm lượng mẫu trắng trung bình cộng với 3 lần độ lệch chuẩn. MDL của các chất còn lại được tính theo giới hạn phát hiện của thiết bị, nhân với thể tích dung dịch phân tích và chia cho khối lượng mẫu bụi. MDL của các PBDEs dao động từ 0,010 đến 0,20 ng/g.

3.2. Kết quả phân tích mẫu thêm chuẩn

Nền mẫu bụi đại diện có hàm lượng PBDEs tổng là 56 ng/g. Sắc đồ của mẫu bụi đại diện không thêm chuẩn và mẫu thêm chuẩn được trình bày trong Hình 1. Các chất có hàm lượng cao nhất bao gồm: BDE-209 (48 ng/g), BDE-206 (3,0 ng/g), BDE-207 (2,0 ng/g), BDE-208 (1,3 ng/g), BDE-183 (0,32 ng/g), BDE-99 (0,19 ng/g). Nền mẫu bụi này được thêm chuẩn hỗn hợp PBDEs với lượng tuyệt đối như sau: 0,8 ng (mono-tri), 1,6 ng (tetra-hexa), 3,2 ng (hepta-octa) và 8,0 ng (nona-deca). Độ

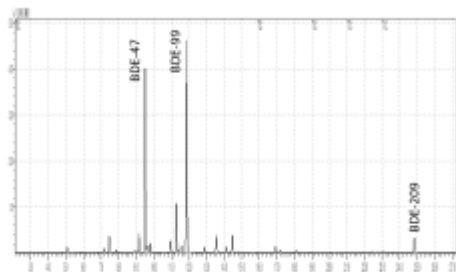
thu hồi của các chất chuẩn PBDEs dao động từ $77 \pm 9\%$ (BDE-1) đến $114 \pm 6\%$ (BDE-66). Độ thu hồi của các chất nhìn chung nằm trong khoảng 65% đến 120% với $RSD < 20\%$. Độ thu hồi của các PBDEs đáp ứng được yêu cầu của Phương pháp tiêu chuẩn 1614A do US EPA ban hành.



Hình 1. Sắc đồ tổng ion (TIC) của PBDEs trong mẫu bụi đại diện không thêm chuẩn và thêm chuẩn.

3.3. Kết quả phân tích mẫu chuẩn SRM

Mẫu chuẩn SRM 2585 được phân tích để đánh giá hiệu lực của toàn bộ quy trình phân tích. Sắc đồ phân tích mẫu bụi SRM 2585 được đưa ra trong Hình 2. Hàm lượng tổng PBDEs trong mẫu bụi này là 5500 ± 67 ng/g. Các chất có nồng độ cao nhất phát hiện được bao gồm: BDE-209 (2800 ± 67 ng/g), BDE-99 (980 ± 38 ng/g), BDE-47 (540 ± 36 ng/g), BDE-206 (200 ± 14 ng/g), BDE-100 ($160,0 \pm 3,6$ ng/g), BDE-207 ($130,0 \pm 2,6$ ng/g) và BDE-153 ($121,0 \pm 4,3$ ng/g). Trong đó, BDE-209 là thành phần chính của hỗn hợp deca-BDE thương mại, còn BDE-47 và BDE-99 là thành phần chính của hỗn hợp penta-BDE thương mại.



Hình 2. Sắc đồ tổng ion (TIC) của PBDEs trong mẫu bụi SRM 2585.

Kết quả phân tích PBDEs trong mẫu chuẩn SRM 2585 bởi phương pháp của chúng tôi nhìn chung phù hợp với giá trị hàm lượng chứng nhận. Tỷ lệ giữa giá trị đo được và giá trị chứng nhận của các chất dao động từ 76% (BDE-206) đến 110% (BDE-99 và BDE-209). Kết quả này cho thấy phương pháp phân tích có độ chính xác cao và khả năng đáp ứng với PBDEs trong khoảng hàm lượng tương đối rộng từ ppb đến ppm. Sự khác biệt khoảng 10% của hàm lượng BDE-99 và BDE-209 giữa giá trị đo được và giá trị chứng nhận có thể được giải thích bởi sự khác nhau về phương pháp xử lý mẫu và phương pháp phân tích của các nghiên cứu. Trên thực tế, hàm lượng BDE-99 và BDE-209 trong mẫu SRM 2585 cũng có sự dao động lớn giữa các nghiên cứu khác nhau (Bảng 1). Hàm lượng BDE-99 và BDE-209 trong mẫu SRM 2585 của nghiên cứu này nhìn chung nằm trong khoảng giá trị của các công bố trước đây. Hơn nữa, kết quả của chúng tôi có độ lặp lại tương đương hoặc tốt hơn so với một số nghiên cứu khác.

Bảng 1. So sánh hàm lượng BDE-99 và BDE-209 (ng/g) trong mẫu bụi SRM 2585 được phân tích bởi các nghiên cứu khác nhau

TLTK	BDE-99	BDE-209
Giá trị chứng nhận	892 ± 53	2510 ± 190
Nghiên cứu này	980 ± 38	2800 ± 67
[6]	902 ± 109	2610 ± 170
[6]	784 ± 57	2380 ± 310
[6]	920 ± 24	2380 ± 250
[7]	1000 ± 120	3400 ± 450
[8]	680 ± 86	2480 ± 500

3.4. Kết quả phân tích mẫu thực tế

Phương pháp phân tích sau khi được thẩm định thông qua độ thu hồi của PBDEs trong mẫu thêm chuẩn và độ chính xác trên mẫu chuẩn SRM 2585 đã được áp dụng để phân tích một số mẫu bụi thực tế thu thập tại khu vực đô thị trung tâm ở Hà Nội. Hàm lượng PBDEs tổng dao động từ 83 đến 1200 ng/g (trung vị 380 ng/g, trung bình 560 ng/g). BDE-209 có hàm lượng cao nhất, dao động từ 72 đến 1000 (trung vị 320, trung bình 520) ng/g. BDE-209

chiếm tỉ lệ từ 83% đến 96% (trung bình $86 \pm 9\%$) của hàm lượng tổng PBDEs. Kết quả này phản ánh nguồn gốc chủ yếu của PBDEs trong môi trường bụi ở khu vực nghiên cứu là các sản phẩm có chứa hỗn hợp deca-BDE thương mại. Các PBDEs có hàm lượng đáng kể khác bao gồm: BDE-207 ($12,0 \pm 8,0$), BDE-206 ($12,0 \pm 7,4$), BDE-208 ($6,9 \pm 5,4$), BDE-183 ($1,40 \pm 0,86$), BDE-99 ($0,83 \pm 1,20$), BDE-47 ($0,53 \pm 0,91$) và BDE-153 ($0,53 \pm 0,46$) ng/g. Đây đều là các thành phần chính của các hỗn hợp deca-, octa- và penta-BDE thương mại.

Với mỗi đợt phân tích mẫu thực tế gồm 1 mẫu trắng và 5 mẫu bụi, nếu sử dụng kỹ thuật chiết cô điển Soxhlet thì cần ít nhất 2 ngày (bao gồm thời gian chuẩn bị bộ chiết, chiết mẫu trong 18 đến 24 h và cô đặc dịch chiết) và khoảng 1.5 đến 2 L dung môi. Trong khi đó, nếu sử dụng phương pháp chiết siêu âm, thời gian chiết 6 mẫu (chiết lặp 2 lần, thời gian li tâm, cô đặc dịch chiết) thì mất khoảng 3 đến 4 h (nửa ngày làm việc) và chỉ cần khoảng 200 mL dung môi. Như vậy phương pháp chiết siêu âm có thể rút ngắn thời gian chuẩn bị mẫu đến 4 lần và lượng dung môi đến 10 lần so với phương pháp chiết Soxhlet, trong khi vẫn đảm bảo được hiệu quả chiết PBDEs trong mẫu bụi.

4. Kết luận

Nghiên cứu này đã đưa ra một phương pháp phân tích đơn giản, nhanh và chính xác các chất chống cháy PBDEs trong mẫu bụi trong nhà ở mức hàm lượng ppb đến ppm. Bằng việc sử dụng kỹ thuật chiết siêu âm trực tiếp với sừng phát siêu âm, thời gian chiết và lượng dung môi chiết đã được giảm đi đáng kể so với các phương pháp chiết truyền thống như Soxhlet/Dean-Stark. Phương pháp phân tích đã đáp ứng được yêu cầu về độ chọn lọc, độ đúng, độ lặp lại và giới hạn phát hiện. Quy trình phân tích sau khi thẩm định đã được áp dụng để phân tích một số mẫu bụi thu thập tại khu vực đô thị ở Hà Nội. Kết quả phân tích cho thấy PBDEs được phát hiện trong tất cả các mẫu ở mức hàm lượng từ 83 đến 1200 ng/g. Trong đó BDE-209 là chất có hàm lượng cao nhất, chiếm tỉ lệ 83% đến 96% hàm lượng tổng PBDEs.

Lời cảm ơn

Hoàng Quốc Anh, VNU.2021.TTS.01, cảm ơn Quỹ Phát triển Đại học Quốc gia Hà Nội đã tài trợ cho nghiên cứu này.

Tài liệu tham khảo

- [1] M. J. L. Guardia, R. C. Hale, E. Harvey, Detailed Polybrominated Diphenyl Ether (PBDE) Congener Composition of the Widely used Penta-, Octa-, and Deca-PBDE Technical Flame-retardant Mixtures, *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 40, 2006, pp. 6247-6254.
- [2] A. Q. Hoang, T. M. Tran, M. B. Tu, S. Takahashi, Polybrominated Diphenyl Ethers in Indoor and Outdoor Dust from Southeast Asia: an Updated Review on Contamination Status, Human Exposure, and Future Perspectives, *Environ. Pollut.*, Vol. 272, 2021, pp. 116012.
- [3] R. J. Law, A. Covaci, S. Harrad, D. Herzke, M. A. E. Abdallah, K. Fernie, L. M. L. Toms, H. Takigami, Levels and Trends of PBDEs and HBCDs in the Global Environment: Status at the End of 2012, *Environ. Int.*, Vol. 65, 2012, pp. 147-158.
- [4] H. Q. Anh, K. Tomioka, N. M. Tue, T. M. Tri, T. B. Minh, S. Takahashi, PBDEs and Novel Brominated Flame Retardants in Road Dust from Northern Vietnam: Levels, Congener Profiles, Emission Sources and Implications for Human Exposure, *Chemosphere*, Vol. 197, 2018, pp. 389-398.
- [5] H. Q. Anh, I. Watanabe, T. B. Minh, N. M. Tue, L. H. Tuyen, P. H. Viet, S. Takahashi, Polychlorinated Biphenyls in Settled Dusts from an End-of-life Vehicle Processing Area and Normal House Dusts in Northern Vietnam: Occurrence, Potential Sources, and Risk Assessment, *Sci. Total Environ.*, Vol. 728, 2020, pp. 138823.
- [6] H. M. Stapleton, T. Harner, M. Shoeib, J. M. Keller, M. M. Schantz, S. D. Leigh, S. A. Wise, Determination of Polybrominated Diphenyl Ethers in Indoor Dust Standard Reference Materials, *Anal. Bioanal. Chem.*, Vol. 384, 2006, pp. 791-800.
- [7] L. Sahlstrom, U. Sellstrom, C. A. de Wit, Clean-up Method for Determination of Established and Emerging Brominated Flame Retardants in Dust, *Anal. Bioanal. Chem.*, Vol. 404, 2012, pp. 459-466.
- [8] A. C. Ionas, A. Covaci, Simplifying Multi-residue Analysis of Flame Retardants in Indoor Dust, *Int. J. Environ. Anal. Chem.*, Vol. 93, 2013, pp. 1074-1083.