

Khảo sát và tối ưu hóa quy trình phân tích tổng thủy ngân trong bụi không khí bằng phương pháp phân hủy hóa học với BrCl

Phạm Thị Diệu Hương^{1,2}, Nguyễn Thị Thúy^{1,2}, Lê Quốc Hậu^{1,2}, Nguyễn Thị Thanh Thảo^{1,2}, Tô Thị Hiền^{1,2}, Nguyễn Lý Sỹ Phú^{1,2,*}



Use your smartphone to scan this QR code and download this article

¹Khoa Môi Trường, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, TP.HCM, Việt Nam

²Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

Liên hệ

Nguyễn Lý Sỹ Phú, Khoa Môi Trường, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, TP.HCM, Việt Nam

Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

Email: nlsphu@hcmus.edu.vn

Lịch sử

- Ngày nhận: 04-07-2025
- Ngày sửa đổi: 25-7-2025
- Ngày chấp nhận: 26-8-2025
- Ngày đăng: 16-01-2026

DOI:

<https://doi.org/10.32508/stdjsee.v10i1.828>



Bản quyền

© ĐHQG Tp.HCM. Đây là bài báo công bố mở được phát hành theo các điều khoản của the Creative Commons Attribution 4.0 International license.



TÓM TẮT

Thủy ngân (Hg) là một kim loại nặng có độc tính cao và chu trình sinh địa hóa phức tạp, đặc biệt là Hg trong không khí vì Hg có thể tồn tại ở cả pha hạt (bụi) và pha khí. Hiện nay phương pháp IO-5 (US-EPA) thường được ứng dụng rộng rãi để phân tích Hg trong bụi không khí (Particulate-bound mercury, PBM), tuy nhiên phương pháp này chỉ đưa ra các khuyến nghị mà không nêu cụ thể cách thức tiến hành. Chính vì vậy, nghiên cứu này nhằm khảo sát và tối ưu hóa quy trình phân tích PBM bằng phương pháp phân hủy hóa học theo hướng dẫn IO-5, sử dụng thiết bị WA-5F (NIC, Nhật Bản). Kết quả cho thấy giới hạn phát hiện của phương pháp đạt 0,22 pg/m³, đủ nhạy để phân tích PBM trong nhiều điều kiện môi trường khác nhau. Các khảo sát mẫu trắng chứng minh mức nhiễm nền thấp và được kiểm soát tốt. Độ tái lập lại của quy trình cho thấy hệ số biến thiên (CV) hầu hết dưới 20%, đạt yêu cầu theo giá trị tham khảo của các mạng lưới quan trắc Hg lớn trên thế giới. Hiệu suất thu hồi dao động từ 84,6-101,6% (trung bình 92,2 ± 6,8%) đối với mẫu thêm chuẩn và 99,8% với mẫu chuẩn so sánh, chứng minh độ tin cậy của quy trình. Ngoài ra, chất oxy hóa BrCl có khả năng chiết tách gần như toàn bộ Hg chỉ sau một lần xử lý mẫu. So sánh với phương pháp phân hủy nhiệt trực tiếp bằng thiết bị MA-3 Solo cho thấy tương quan cao (R² = 0,96), khẳng định độ chính xác và tính ứng dụng thực tiễn. Kết quả nghiên cứu góp phần xây dựng quy trình phân tích hiệu quả, phục vụ công tác giám sát Hg trong không khí và cung cấp dữ liệu khoa học quan trọng để đánh giá nguy cơ sức khỏe từ phơi nhiễm PBM trong bối cảnh ô nhiễm đô thị ngày càng gia tăng.

Từ khóa: Thủy ngân, bụi không khí, IO-5, BrCl, hiệu suất thu hồi

GIỚI THIỆU

Thủy ngân (Hg) là một kim loại nặng có độc tính và khả năng tích lũy sinh học cao, tồn tại nhiều trong không khí và có thể được vận chuyển trên phạm vi rộng nhờ chu trình tuần hoàn trong khí quyển^{1,2,1,2}. Khi lắng đọng từ không khí vào các môi trường khác, Hg có thể thâm nhập vào các hệ sinh thái và chuyển hóa thành dạng methyl Hg (MeHg), một dạng dễ tích lũy trong chuỗi thức ăn, làm gia tăng nguy cơ đối với sức khỏe sinh thái và con người³. Theo thống kê của UNEP (2013)⁴ lượng Hg chứa đựng trong khí quyển là 4400 - 5300 tấn trong đó khoảng 10% nguồn tự nhiên, 30% đến từ nguồn nhân tạo nguồn còn lại là tái phát thải chiếm 60% (Hg lắng đọng trong quá khứ phát thải trở lại không khí)⁵.

Trong khí quyển, Hg tồn tại chủ yếu dưới ba dạng: Hg nguyên tố ở thể khí (Gaseous Elemental Mercury – GEM), Hg oxy hóa ở thể khí (Gaseous Oxidized Mercury – GOM) và Hg liên kết pha hạt (Particulate-Bound Mercury – PBM). Trong đó, GEM là dạng phổ biến nhất, tương đối bền vững, ít bị lắng đọng và có

thời gian tồn tại dài trong khí quyển, dao động từ 1 đến 1,5 năm^{4,6}. Ngược lại, GOM và PBM tuy chỉ chiếm dưới 5% tổng lượng Hg trong không khí nhưng lại có khả năng lắng đọng cao và tác động lớn hơn đến sinh thái^{2,5}. Đặc biệt PBM khi liên kết với các hạt bụi mịn (PM_{2.5}), Hg có khả năng ảnh hưởng trực tiếp đến sức khỏe con người do có thể xâm nhập sâu vào hệ hô hấp^{7,8}. Dù có xu hướng lắng đọng nhanh, một phần PBM liên kết với PM_{2.5} vẫn có thể phát tán xa trên phạm vi khu vực hoặc liên lục địa nhờ vào tốc độ lắng đọng tương đối thấp⁹⁻¹¹. Nồng độ PBM, đặc biệt là PBM_{2.5}, không chỉ phản ánh tình trạng ô nhiễm không khí mà còn được xem là một trong những chỉ thị môi trường quan trọng. Xuất phát từ các nguồn phát thải nhân sinh như công nghiệp, giao thông và đốt nhiên liệu hóa thạch có thể làm gia tăng rõ rệt hàm lượng PBM trong khí quyển^{2,4}. Do đó, việc theo dõi nồng độ và nhận diện nguồn gốc phát thải của PBM đóng vai trò thiết yếu trong công tác đánh giá rủi ro sức khỏe cộng đồng và xây dựng chiến lược kiểm soát ô nhiễm Hg hiệu quả.

Trích dẫn bài báo này: Hương P T D, Thúy N T, Hậu L Q, Thảo N T T, Hiền T T, Phú N L S. **Khảo sát và tối ưu hóa quy trình phân tích tổng thủy ngân trong bụi không khí bằng phương pháp phân hủy hóa học với BrCl.** *Sci. Tech. Dev. J. - Sci. Earth Environ.* 2026; 10(11):1194-1203.

Bụi không khí thường được thu thập trên các giấy lọc bằng thiết bị chuyên dụng, sau đó được phân tích trong phòng thí nghiệm để định lượng hàm lượng PBM. Hiện nay, hai kỹ thuật chính được áp dụng để phân tích PBM là phân hủy nhiệt trực tiếp và phân hủy bằng phương pháp hóa học^{9,12}. Phân hủy nhiệt trực tiếp là phương pháp đơn giản, nhanh chóng, trong đó mẫu được nung ở nhiệt độ cao (600 - 800 °C) để giải phóng Hg từ pha bụi dưới dạng nguyên tố (Hg⁰), sau đó được định lượng bằng đầu dò thích hợp. Tuy nhiên, hạn chế lớn của kỹ thuật này là không thể áp dụng đối với các loại giấy lọc như teflon hoặc màng lọc trao đổi ion (cation exchange membrane - CEM). Những vật liệu này có khả năng sinh ra các hợp chất halogen trong quá trình nung, gây hư hại cho bộ xúc tác trong thiết bị, làm giảm hiệu suất phân tích và tuổi thọ của máy^{12,13}. Trong khi đó, phương pháp phân hủy hóa học trong đó PBM được chiết tách và khử về dạng Hg⁰ bằng các hóa chất có tính khử mạnh, được đánh giá có tính linh hoạt hơn, đặc biệt khi phân tích các mẫu giấy lọc teflon hoặc CEM. Phương pháp IO-5 do Cơ quan Bảo vệ Môi trường Hoa Kỳ (US-EPA) ban hành là một trong những phương pháp được áp dụng rộng rãi nhất hiện nay cho phân tích PBM. Phương pháp IO-5 không hướng dẫn cụ thể quy trình chiết tách cho phép các phòng thí nghiệm điều chỉnh quy trình chiết theo điều kiện thực tế và trang thiết bị hiện có^{12,14}. Điều này đặc biệt quan trọng trong bối cảnh thiết bị và điều kiện phòng thí nghiệm có thể khác nhau đáng kể giữa các quốc gia hoặc cơ sở nghiên cứu. Hầu hết các nghiên cứu hiện tại áp dụng IO-5 trên hệ thống Tekran 2600 với hệ kín, giúp hạn chế sai số trong quá trình phân tích. Trong khi đó, một số thiết bị như WA-5F (NIC, Nhật Bản) sử dụng hệ impinger để sục mẫu và phân tích Hg trong mẫu lỏng, tuy nhiên hiệu suất và độ chính xác của hệ thống này vẫn chưa được đánh giá cụ thể.

Nghiên cứu này tập trung xây dựng và tối ưu hóa quy trình phân tích PBM, sử dụng phương pháp phân hủy hóa học theo hướng dẫn IO-5¹⁵. Quy trình phân hủy và định lượng được thiết kế cho thiết bị WA-5F, một hệ thống đang được trang bị phổ biến tại nhiều phòng thí nghiệm ở khu vực Đông Nam Á và Việt Nam. Thông qua loạt thí nghiệm kiểm tra hiệu suất, độ lặp lại và độ tin cậy của phương pháp, nghiên cứu đã xác định các thông số vận hành tối ưu, đồng thời đề xuất các cải tiến nhằm nâng cao tính ứng dụng thực tiễn tại các phòng thí nghiệm. Kết quả nghiên cứu không chỉ góp phần hoàn thiện quy trình phân tích PBM, mà còn cung cấp công cụ kỹ thuật đáng tin cậy phục vụ công tác giám sát ô nhiễm không khí. Đặc biệt, việc tối ưu hóa quy trình trên nền tảng thiết bị phổ biến trong khu vực giúp tăng khả năng chuyển giao và

nhân rộng, từ đó hỗ trợ cộng đồng khoa học và quản lý môi trường trong việc đánh giá rủi ro sức khỏe, xây dựng chính sách kiểm soát Hg và bảo vệ hệ sinh thái một cách hiệu quả hơn.

PHƯƠNG PHÁP

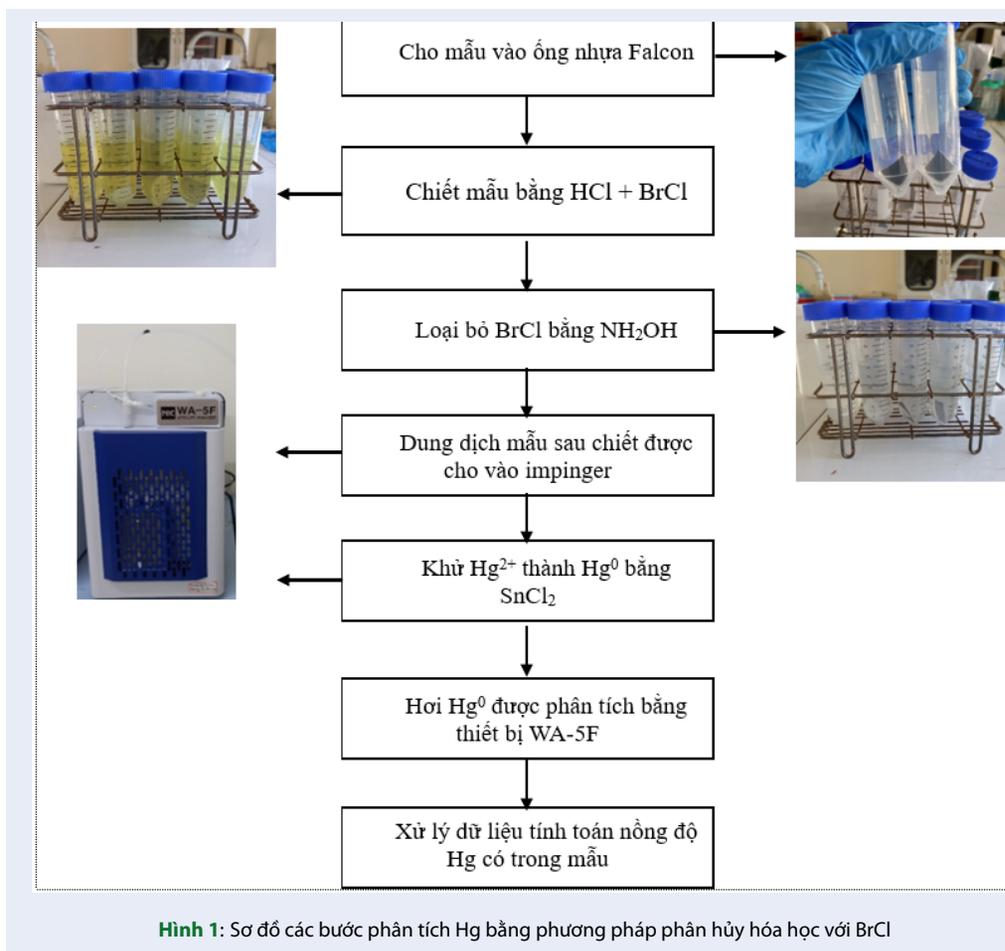
Vị trí nghiên cứu

Các khảo sát tối ưu hóa quy trình phân tích mẫu PBM được thực hiện tại phòng thí nghiệm Hg trong môi trường, khoa Môi Trường, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, ĐHQG-HCM. Bên cạnh đó, để đánh giá độ tin cậy của phương pháp, một số mẫu bụi không khí được thu thập bằng thiết bị lấy mẫu thể tích lớn Kimoto (model 120H, Kimoto Electric Co.), với vận tốc lấy mẫu được duy trì ở mức 600 L/phút trong 24 giờ tại vị trí nghiên cứu. Những mẫu bụi này được thu thập tại Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, ĐHQG-HCM cơ sở 1, Phường Chợ Quán, TP. Hồ Chí Minh. Mẫu bụi được thu trên giấy lọc thủy tinh kích thước A4 (Advantec MFS, GA-55, 203 × 254 mm). Giấy lọc phải được nung tại 500 °C trong ít nhất 8 giờ trước khi sử dụng nhằm loại bỏ Hg bám trên giấy lọc. Các mẫu bụi này được sử dụng cho hai mục đích chính: (1) đánh giá độ lặp lại của quy trình phân tích PBM và (2) so sánh hiệu quả giữa phương pháp hóa học và phương pháp phân hủy nhiệt trực tiếp.

Quy trình phân tích Hg có trong mẫu giấy lọc

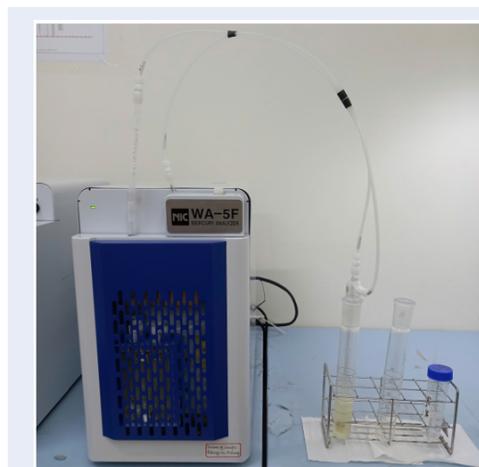
Quy trình chiết Hg từ giấy lọc được thiết kế riêng trong nghiên cứu, các bước được thể hiện trong Hình 1. Mẫu giấy lọc được đặt vào ống Falcon 50 mL và tiến hành phân hủy bằng hỗn hợp HCl và BrCl. Tùy theo kích thước, giấy lọc có thể được gấp lại để vừa với ống, đảm bảo hạn chế tối đa sự nhiễm bẩn bằng cách sử dụng găng tay, nhíp sạch và tránh chạm vào mặt trong ống. Sau đó, thêm 25 mL dung dịch HCl 1% pha từ HCl tinh khiết (Merck, 37%) và nước khử ion vào ống, lắc nhẹ để làm ướt đều giấy lọc. Tiếp theo, thêm 3 mL dung dịch BrCl (được pha chế từ KBr và KBrO₃ theo tỷ lệ được hướng dẫn bởi IO-5) vào ống chứa mẫu, đưa tổng thể tích dung dịch lên 28 mL. Mẫu được đặt lên máy lắc trong vòng 1 giờ, sau đó để yên trong ít nhất 12 giờ (thời gian ngâm chiết hiệu quả được đề nghị bởi phương pháp US EPA 1631E). Trong bước này, việc sử dụng thể tích tương đối lớn của cả HCl và BrCl so với khuyến nghị của IO-5 (5-10 mL) nhằm đảm bảo giấy lọc ngập hoàn toàn trong dung dịch. Đây là cải tiến quan trọng trong quy trình phân tích PBM trong nghiên cứu.

Sau quá trình chiết, để trung hòa lượng BrCl dư, thêm vào 100 µL dung dịch hydroxylamin (NH₂OH) 30%,



lắc nhẹ và để yên trong 15 phút. Nếu dung dịch vẫn còn màu vàng, cho thêm một lượng NH_2OH tương tự đến khi dung dịch mất hoàn toàn màu vàng. (Lưu ý, thể tích tổng không được vượt quá 30 mL). Khi dung dịch đã trong suốt, cho toàn bộ dung dịch sang bình sục khí 50 mL (impinger) thêm 0,5 mL dung dịch SnCl_2 20% vào để khử Hg^{2+} thành dạng nguyên tố (Hg^0). Bình sục phải được đậy nắp ngay lập tức sau khi cho SnCl_2 để tránh sai số do Hg bay hơi. Hơi Hg được khí mang Ar (tinh khiết 99,999%) sục vào impinger và đưa vào hệ thống phân tích WA-5F, sử dụng đầu dò huỳnh quang phát xạ nguyên tử (AFS) để định lượng hàm lượng Hg có trong mẫu (Hình 2).

Một số lưu ý trong quá trình chuẩn bị hóa chất phân tích bao gồm: đặc biệt lưu ý việc pha chế dung dịch BrCl, các hóa chất trước khi sử dụng cần được nung ở 180°C trong ít nhất 8 giờ để loại bỏ Hg có thể có trước khi pha. Đối với dung dịch SnCl_2 , cần sục khí argon (Ar) để làm sạch trong tối thiểu 4 tiếng nhằm loại bỏ Hg có trong hóa chất và đảm bảo độ tinh khiết cần thiết cho phân tích.



Hình 2: Thiết bị WA-5F và hệ sục khí

Giới hạn phát hiện và khoảng tuyến tính của đường chuẩn theo thiết bị WA-5F

Giới hạn phát hiện phương pháp (MDL) được ước tính từ LOD của thiết bị và thể tích không khí lấy mẫu trong 24 giờ (Phương trình 1). Đây là giá trị LOD lý thuyết, được tính toán trong điều kiện lý tưởng dựa trên mẫu trắng, không phải là LOD thực nghiệm được xác định trên mẫu thật có yếu tố nhiễu nền.

$$MDL = (3,3 \times s)/(S \times 108) \quad (1)$$

Trong đó:

- MDL: Giới hạn phát hiện (pg/m^3)
- s: Độ lệch chuẩn của giá trị RF
- S: Giá trị RF trung bình
- 108: Thể tích (m^3) ước lượng ứng với thể tích mẫu được phân tích trong nghiên cứu

Đường chuẩn được xây dựng từ dung dịch chuẩn gốc Hg (1000 mg/L, Merck, Supelco) bằng cách pha loãng đến dung dịch làm việc có nồng độ 1 ng/mL. Từ dung dịch làm việc này, mười mức nồng độ chuẩn trong khoảng từ 0,02 đến 6 ng Hg (ứng với thể tích dung dịch 25 mL) đã được thiết lập để xây dựng đường chuẩn.

Tối ưu hóa quy trình phân tích mẫu

Khảo sát mẫu trắng phân tích

Các hóa chất sử dụng trong phân tích và điều kiện phòng thí nghiệm là yếu tố quan trọng có thể tác động đến độ tin cậy của phép phân tích với hàm lượng Hg siêu vết (pg đến ng). Chính vì vậy, việc đảm bảo để hạn chế tác động của sai số gây ra bởi các yếu tố này là điều cần thiết. Nghiên cứu sử dụng mẫu trắng để kiểm soát quá trình nhiễm Hg do hóa chất và điều kiện thí nghiệm. Cụ thể mẫu trắng gồm có: dung dịch HCl 1%, dung dịch BrCl, dung dịch NH_2OH 30% và dung dịch SnCl_2 20%. Các mẫu trắng này sẽ được phân tích như quy trình được miêu tả cụ thể tại mục **Quy trình phân tích Hg có trong mẫu giấy lọc**.

Bên cạnh đó, mẫu trắng hiện trường cũng được thực hiện. Những mẫu này được sử dụng giấy lọc cùng loại và xử lý giống mẫu thật, lắp vào thiết bị lấy mẫu tại hiện trường nhưng không bật bơm hút khí. Quá trình lắp đặt, tiếp xúc với môi trường xung quanh, vận chuyển, bảo quản và xử lý mẫu trắng đều được thực hiện giống hoàn toàn mẫu thật để đảm bảo tính tương đồng trong điều kiện nhiễm bẩn tiềm tàng. Sau khi thu thập, mẫu trắng hiện trường được đưa về phòng thí nghiệm và xử lý theo đúng quy trình phân tích Hg như mẫu thật (như được trình bày trong mục **Quy trình phân tích Hg có trong mẫu giấy lọc**). Giá trị Hg thu được từ các mẫu trắng hiện trường sẽ được so sánh với MDL và nồng độ của các mẫu thực để đánh giá mức độ nhiễm bẩn. Việc phân tích mẫu trắng hiện

trường là một bước thiết yếu nhằm đánh giá mức độ nhiễm bẩn của quy trình thu thập và xử lý mẫu, đồng thời giúp phát hiện và điều chỉnh các bước gây sai số hệ thống trong quá trình nghiên cứu.

Khảo sát độ tái lập lại kết quả phân tích của quy trình

Độ tái lập lại là một tiêu chí quan trọng để đánh giá mức độ ổn định và độ tin cậy của quy trình phân tích. Khảo sát này được thực hiện nhằm kiểm tra khả năng tái lập của phương pháp chiết tách và phân tích PBM trên giấy lọc. Mỗi mẫu được chia thành 3 phần bằng nhau và được phân tích đồng thời để đánh giá độ tái lập. Các mẫu được xử lý độc lập theo quy trình chiết tách và phân tích bằng thiết bị WA-5F. Độ tái lập của phương pháp được đánh giá thông qua hệ số biến thiên (CV), được tính từ độ lệch chuẩn (SD) và giá trị trung bình (x) của ba phép đo lặp lại cho mỗi mẫu. Giá trị CV càng thấp cho thấy độ ổn định và tính nhất quán của phương pháp càng cao. Cách tính CV được thể hiện trong phương trình 2:

$$CV\% = \frac{SD}{x} 100 \quad (2)$$

Khảo sát hiệu quả chiết tách phân hủy mẫu 2 lần

Thí nghiệm này nhằm đánh giá hiệu quả chiết tách Hg từ mẫu bụi thu trên giấy lọc bằng dung dịch HCl và BrCl theo quy trình nêu tại mục **Quy trình phân tích Hg có trong mẫu giấy lọc**. Mục tiêu chính là xác định mức độ chiết tách Hg trong một lần xử lý mẫu, từ đó đánh giá độ thu hồi và hiệu quả của quy trình phân tích.

Phương pháp chiết tách Hg hiện hành, được khuyến nghị trong hướng dẫn IO-5, thường chỉ thực hiện một lần. Để kiểm tra hiệu suất của quá trình chiết tách, một thí nghiệm chiết hai lần đã được thiết kế. Mẫu bụi được xử lý lần đầu theo quy trình (mô tả tại Mục **Quy trình phân tích Hg có trong mẫu giấy lọc**), sau đó phần giấy lọc đã được chiết tách lại được tiếp tục xử lý lại theo cùng quy trình và phân tích lần hai. Lượng Hg thu được từ mẫu trong 2 lần được so sánh để tổng lượng Hg thu được sau hai lần xử lý sẽ được sử dụng để tính toán hiệu suất chiết tách của lần đầu.

Nếu lượng Hg thu được ở lần chiết thứ hai chiếm tỷ lệ nhỏ (<5%) so với lượng Hg chiết tách được trong lần 1, điều này cho thấy phương pháp chiết tách đạt hiệu quả cao, với phần lớn Hg đã được chiết tách trong lần xử lý đầu tiên^{11,12}.

Bên cạnh thí nghiệm phân hủy mẫu hai lần, một thí nghiệm thực hiện khử bằng SnCl_2 hai lần trên cùng 1 mẫu được thực hiện nhằm đánh giá hiện tượng carry-over (lượng Hg còn lại chưa được khử hết trong dung

dịch hoặc Hg tồn đọng trong đường ống) trong hệ thống. Cụ thể, sau khi cho SnCl₂ vào dung dịch chiết để phân tích mẫu lần 1, tiến hành cho thêm lượng SnCl₂ tương tự và sục khí đo lần 2 nhằm kiểm tra lượng Hg còn lại trong hệ thống và trong dung dịch.

Khảo sát hiệu suất thu hồi

Để đánh giá độ chính xác và hiệu quả của quy trình phân tích, nghiên cứu thực hiện thí nghiệm kiểm tra hiệu suất thu hồi bằng cách thêm một lượng Hg cụ thể vào mẫu giấy lọc. Cụ thể, mẫu giấy lọc chứa bụi không khí được cho vào ống Falcon 50mL sau đó được thêm lượng Hg từ dung dịch chuẩn tương ứng khoảng 1 ng Hg. Sau khi thêm chuẩn, các mẫu được xử lý theo quy trình đã được nêu tại mục **Quy trình phân tích Hg có trong mẫu giấy lọc**. Lượng Hg thu hồi được sau quá trình xử lý được so sánh với lượng Hg đã thêm vào để tính toán hiệu suất thu hồi.

Bên cạnh đó, độ đúng của phương pháp phân tích được xác định bằng phân tích mẫu NIST SRM 1648a (bụi đô thị tiêu chuẩn). NIST SRM 1648a là một vật liệu chuẩn tham chiếu (Standard Reference Material – SRM) được phát triển bởi Viện Tiêu chuẩn và Công nghệ Quốc gia Hoa Kỳ (National Institute of Standards and Technology – NIST), đại diện cho bụi đô thị môi trường xung quanh. SRM 1648a được sử dụng rộng rãi trong các nghiên cứu về ô nhiễm không khí, đánh giá phơi nhiễm với các kim loại nặng và các chất ô nhiễm khác trong bụi mịn. Vật liệu này thu thập trong một thiết bị túi lọc đặc biệt tại khu vực đô thị ở St. Louis, Missouri, USA và sau đó được xử lý để đảm bảo tính đồng nhất cao và ổn định lâu dài. SRM 1648a được chứng nhận cho hàm lượng của nhiều nguyên tố vô cơ (Hg = 1,323 ± 0,064 mg/kg) và một số hợp chất hữu cơ, giúp các phòng thí nghiệm kiểm tra độ chính xác và hiệu chuẩn các phương pháp phân tích. Đây là một trong những SRM quan trọng trong lĩnh vực nghiên cứu môi trường, đặc biệt trong việc đánh giá tác động sức khỏe do hít phải bụi mịn chứa các chất gây độc hại và các hợp chất carbon^{16,17}.

Nếu kết quả phân tích cho thấy sự tương đồng giữa giá trị đo được và giá trị chứng nhận nằm trong giới hạn cho phép (±10%), chứng tỏ phương pháp có độ đúng tốt và phù hợp để định lượng PBM trong mẫu không khí môi trường.

So sánh với phương pháp phân hủy nhiệt trực tiếp

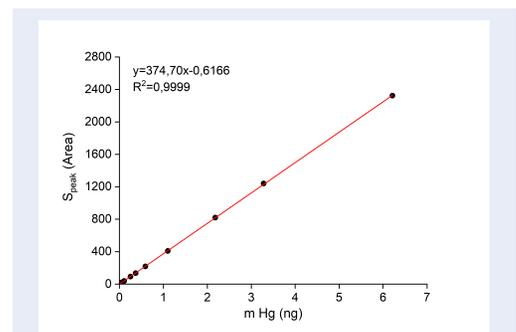
Để so sánh kết quả thu được từ hai phương pháp phân tích, nghiên cứu thực hiện phân tích cùng một mẫu bằng phương pháp chiết hóa học và phân tích bằng thiết bị WA-5F và phương pháp phân hủy nhiệt trực

tiếp sử dụng thiết bị MA-3 Solo. Mỗi mẫu bụi thu thập được sẽ được chia thành 2 phần bằng nhau để mang đi phân tích, khảo sát được thực hiện trên 20 mẫu. Mẫu bụi một phần được phân tích tại phòng thí nghiệm Trường Đại học Khoa học Tự nhiên và phần còn lại được phân tích tại phòng thí nghiệm Đại học Quốc lập Trung Ương Đài Loan, là phòng thí nghiệm tiêu chuẩn của mạng lưới quan trắc Hg châu Á, Thái Bình Dương (Asia-Pacific Mercury Monitoring Network, <http://apmmn.org/>), có nhiều kinh nghiệm trong phân tích Hg. Kết quả được so sánh đối chiếu nhằm đánh giá độ tin cậy của phương pháp được tối ưu hóa.

KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Giới hạn phát hiện và khoảng tuyến tính của thiết bị WA-5F

Kết quả tính ước lượng MDL của phương pháp phân tích sử dụng thiết bị WA-5F đạt khoảng 0,22 pg/m³, với thể tích mẫu tương ứng là 108 m³. Mức MDL này thấp hơn đáng kể so với nồng độ PBM trung bình trong nghiên cứu tại TP.HCM là 67,3 ± 45,9 (14,6-306,6) pg/m³⁹, và cũng thấp hơn so với nồng độ PBM trung bình tại các khu vực nền trên thế giới là 25,3 ± 29,7 (0,6-166) pg/m³¹⁸. Những kết quả này cho thấy rằng hệ thống WA-5F có độ nhạy cao và phương pháp lấy mẫu phù hợp, đủ khả năng phát hiện và định lượng PBM ngay cả trong điều kiện môi trường có nồng độ Hg rất thấp. Bên cạnh đó, kết quả hiệu chuẩn cho thấy hệ thống WA-5F có độ tuyến tính rất tốt (R² = 0,9999) trong dải nồng độ từ 0,02 đến 6,21 ng Hg (Hình 3), cho thấy độ tin cậy cao của thiết bị trong việc phân tích PBM ở dải nồng độ từ pg đến ng.



Hình 3: Tương quan giữa khối lượng Hg (ng) và tín hiệu diện tích peak từ thiết bị WA-5F

Khảo sát các thông số liên quan quá trình phân tích mẫu

Mẫu trắng phân tích

Khảo sát 10 mẫu trắng không chứa giấy lọc ($\text{HCl} + \text{BrCl} + \text{NH}_2\text{OH} + \text{SnCl}_2$) cho thấy kết quả trung bình của nồng độ Hg là $0,026 \pm 0,006$ ng ($0,019-0,041$ ng), trong tổng thể tích tương ứng được dùng để phân tích mẫu thật. Kết quả này bằng 0,89% so với mẫu khảo sát thực tế (2,92 ng). Mức nền này thấp và ổn định, cho thấy các hóa chất được sử dụng đáp ứng yêu cầu về độ tinh khiết cho phân tích Hg ở hàm lượng siêu vết và phù hợp với phương pháp phân tích PBM trong không khí tại TP.HCM. Điều này đảm bảo rằng Hg đóng góp từ hóa chất vào tổng hàm lượng Hg trong mẫu là không đáng kể, từ đó nâng cao độ tin cậy của kết quả phân tích.

Mẫu trắng hiện trường

Trong quá trình xây dựng và tối ưu hóa quy trình phân tích PBM trong không khí, việc kiểm soát nhiễm bẩn nền thông qua mẫu trắng hiện trường đóng vai trò thiết yếu nhằm đảm bảo độ chính xác và độ tin cậy của kết quả. Tổng cộng 8 mẫu trắng đã được thu thập và đánh giá.

Kết quả phân tích cho thấy nồng độ Hg trong các mẫu trắng dao động từ 0,018 ng đến 0,079 ng, với giá trị trung bình là $0,047 \pm 0,022$ ng ($n = 8$). Giá trị trung bình này cao hơn mức giới hạn định lượng 0,024 ng khoảng 1,9 lần, tuy nhiên vẫn thấp hơn đáng kể so với nồng độ PBM trong các mẫu thực tế. So với giá trị trung bình các mẫu thực tế là 2,92 ng ($n=20$) giá trị mẫu trắng hiện trường bằng 1,6%, thấp hơn mức khuyến nghị là 2% theo IO-5 cũng như các mạng lưới quan trắc trên thế giới^{12,15}. Cho thấy quy trình lấy mẫu, bảo quản và xử lý trong phòng thí nghiệm đã được kiểm soát tốt và phù hợp cho điều kiện tại TP.HCM.

Độ tái lập lại kết quả phân tích của quy trình

Kết quả phân tích độ tái lập lại của quy trình đo nồng độ Hg trong các mẫu bụi PM tại vị trí NVC cho thấy mức độ ổn định tốt của phương pháp phân tích. Các mẫu 1, 2 và 3 cùng được phân tích cho kết quả nồng độ Hg ổn định. Giá trị CV của các phép đo là 7,3% nằm dưới mức giới hạn $\pm 20\%$ theo tiêu chuẩn US EPA 7473 (Phương pháp 7473 của Cơ quan Bảo vệ Môi trường Hoa Kỳ), kết quả khảo sát đảm bảo tính tin cậy của quy trình. Điều này chứng tỏ quy trình phân tích Hg bằng phương pháp hóa học và phân tích bằng thiết bị WA-5F có độ tái lập lại tốt, phù hợp để đánh giá chính xác nồng độ PBM trong nghiên cứu.

Kết quả kiểm tra hiệu suất thu hồi

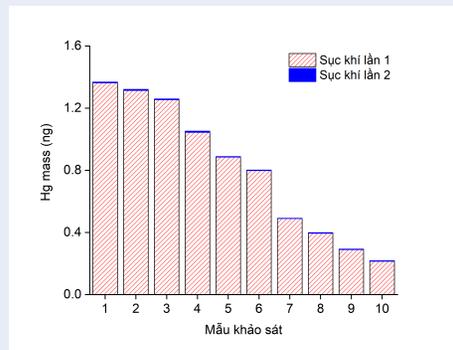
Hiệu suất thu hồi của các mẫu thêm chuẩn được sử dụng để đánh giá độ chính xác và khả năng thu hồi của phương pháp phân tích Hg trong các mẫu không khí. Kết quả cho thấy hiệu suất thu hồi dao động trong khoảng từ 84,6% đến 101,6% (trung bình $92,2 \pm 6,8\%$, $n=9$), nằm trong giới hạn chấp nhận được từ 80% đến 120% phù hợp với tiêu chuẩn cho các phương pháp phân tích vi lượng theo khuyến cáo của US EPA¹⁹ cũng như các mạng lưới quan trắc Hg lớn trên thế giới¹². Kết quả này chứng tỏ phương pháp phân tích có độ chính xác chấp nhận được, phù hợp để áp dụng trong phân tích hàm lượng Hg tổng trong các mẫu bụi mịn trong môi trường không khí.

Bên cạnh đó, hiệu suất thu hồi cũng được xác định thông qua phân tích mẫu chuẩn tham chiếu NIST SRM 1648a (bụi đô thị tiêu chuẩn) đã được chứng nhận về hàm lượng của nhiều nguyên tố vô cơ, bao gồm cả Hg. Kết quả cho thấy hiệu suất thu hồi trung bình đạt $99,8 \pm 7,2\%$ ($n = 5$), nằm trong khoảng giá trị chấp nhận được ($\pm 20\%$). Điều này cho thấy phương pháp phân tích có khả năng đo lường chính xác hàm lượng Hg trong mẫu bụi môi trường, đồng thời không có sự mất mát đáng kể của Hg trong quá trình chuẩn bị và phân tích mẫu. Việc đạt được hiệu suất thu hồi tốt trên mẫu tham chiếu khẳng định độ tin cậy của quy trình phân tích.

Hiệu quả chiết tách

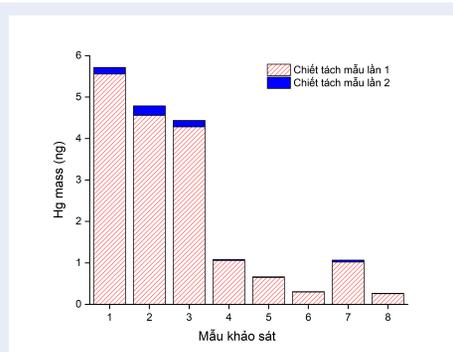
Thí nghiệm sục khí hai lần sau khi bổ sung SnCl_2 được thực hiện nhằm đánh giá khả năng thu hồi Hg và xác định hiện tượng carry-over trong hệ thống. Kết quả cho thấy lượng Hg thu được trong lần sục khí thứ hai đều ở mức rất thấp so với lần đầu, với tỷ lệ trung bình là 0,72% (0,36-1,36%), thấp hơn nhiều so với ngưỡng 5% thường được xem là giới hạn chấp nhận cho hiệu quả thu hồi cao (Hình 4).

Bên cạnh đó, hiệu suất chiết tách của quy trình phân tích Hg được đánh giá thông qua hai lần chiết liên tiếp trên mỗi mẫu (Hình 5). Kết quả cho thấy phần lớn Hg đã được thu hồi ngay từ lần chiết đầu tiên, với hiệu suất dao động từ 95,19% đến 97,81%. Tỷ lệ Hg còn lại ở lần chiết thứ hai chỉ chiếm từ 2,19% đến 4,81% (0,009-0,231 ng), cho thấy quy trình chiết và phân tích có khả năng thu hồi gần như toàn bộ lượng PBM trong mẫu bụi. Khi so sánh giữa các nhóm mẫu có hàm lượng Hg cao (từ 3,3-5,6 ng) và nhóm có hàm lượng thấp hơn (dưới 1,1 ng), không thấy sự khác biệt nhất định trong tỷ lệ Hg thu hồi ở lần chiết thứ hai. Cụ thể, ở nhóm có nồng độ cao, tỷ lệ chiết lần 2 dao động từ 2,78% đến 4,81%, trong khi ở nhóm nồng độ thấp hơn, tỷ lệ này dao động từ 2,19% đến 4,45%. Nhìn



Hình 4: Kết quả thí nghiệm sục khí và phân tích hai lần nhằm đánh giá carry-over hệ thống

chung, lượng Hg còn lại ở lần chiết thứ hai là rất nhỏ, cho thấy quy trình chiết và phân tích có khả năng thu hồi gần như toàn bộ lượng PBM trong mẫu bụi. Điều này khẳng định độ tin cậy cao của phương pháp, đảm bảo rằng kết quả định lượng tổng Hg trong mẫu bụi không khí sẽ ít bị sai lệch.

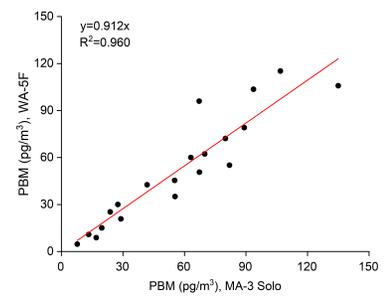


Hình 5: Kết quả khảo sát chiết tách mẫu 2 lần

So sánh hiệu quả phân tích của thiết bị WA-5F và MA-3 Solo

Việc so sánh kết quả phân tích giữa hai phòng thí nghiệm, sử dụng hai phương pháp phân tích khác nhau nhằm đánh giá độ tin cậy của kết quả phân tích cũng như tính tương quan giữa hai phương pháp (thí nghiệm liên phòng trên hai phương pháp tương đối khác biệt). Kết quả cho thấy các giá trị đo được từ WA-5F có sự tương đồng cao với kết quả từ thiết bị MA-3 Solo).

Kiểm định thống kê cho thấy không có sự khác biệt (paired t-test, $p > 0,05$) về giá trị nồng độ Hg đo được bởi hai phương pháp. Một số mẫu với nồng độ Hg cao cho thấy xu hướng nồng độ phân tích bởi phương



Hình 6: Tương quan giữa kết quả phân tích của hệ WA-5F và MA-3 Solo.

pháp phân hủy trực tiếp (MA-3 Solo) cao hơn so với phương pháp phân hủy hóa học, điều này có thể được giải thích là do quá trình phân hủy mẫu hóa học có thời gian dài hơn và có thể gây thất thoát Hg do bay hơi hoặc hấp thụ vào thành ống nghiệm. Nhìn chung, kết quả cho thấy cả hai phương pháp phân hủy nhiệt trực tiếp và phương pháp phân hủy hóa học với BrCl đều cho kết quả tương tự và đáng tin cậy. Sự sai khác chấp nhận được trong giới hạn cho phép cho thấy độ tin cậy của thiết bị WA-5F trong phân tích thực tế.

Ngoài ra, mối tương quan giữa hai thiết bị cũng được đánh giá thông qua biểu đồ hồi quy tuyến tính giữa kết quả phân tích từ WA-5F và MA-3 Solo (Hình 6). Đường hồi quy thu được có hệ số tương quan bình phương $R^2 = 0,960$, cho thấy mối tương quan tuyến tính rất tốt giữa hai thiết bị. Hệ số góc xấp xỉ 1 chứng tỏ WA-5F cho kết quả gần tương đương với MA-3 Solo, không có xu hướng chênh lệch đáng kể ở các mức nồng độ khác nhau. Kết quả này cho thấy phương pháp phân tích được thiết lập trên hệ thống WA-5F và điều kiện phòng thí nghiệm trong nghiên cứu này (phòng thí nghiệm không có phòng sạch chuyên dụng) cũng có khả năng cho kết quả với độ chính xác cao khi so sánh với phương pháp phân tích trên thiết bị tham chiếu MA-3 Solo và được thực hiện tại phòng thí nghiệm tiêu chuẩn của mạng lưới quan trắc Hg Châu Á, Thái Bình Dương. Từ kết quả này, đồng thời chứng minh tính phù hợp của WA-5F để ứng dụng trong quy trình phân tích tại TP.HCM đảm bảo độ tin cậy về mặt định lượng.

KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã khảo sát và tối ưu hóa thành công quy trình phân tích Hg trong bụi không khí, sử dụng phương pháp phân hủy hóa học bằng BrCl trên thiết bị WA-5F. Việc tối ưu hóa tập trung vào điều chỉnh thể tích HCl và BrCl trong bước chiết mẫu nhằm tăng hiệu suất chiết tách Hg, so với các phương pháp tham

chiều trước đây. Kết quả đạt được MDL ở mức thấp khoảng $0,22 \text{ pg/m}^3$. Các chỉ tiêu đánh giá độ tin cậy của quy trình phân tích bao gồm hiệu suất thu hồi cao đối với mẫu spike chuẩn và mẫu chuẩn tham chiếu NIST SRM 1648a, mức độ nhiễm nền thấp ($<2\%$), độ lặp lại tốt (hệ số biến thiên $CV = 7,3\%$), và hiệu suất chiết tách cao ($> 95\%$), cho thấy quy trình đạt độ tin cậy và độ ổn định cao. Đặc biệt, so sánh kết quả phân tích mẫu bụi thực tế với phương pháp phân hủy nhiệt trực tiếp (sử dụng thiết bị MA-3 Solo) cho thấy mối tương quan chặt chẽ, chứng minh tính khả thi và độ chính xác của phương pháp đã được phát triển. Phương pháp này có tiềm năng ứng dụng rộng rãi trong các chương trình quan trắc môi trường không khí định kỳ tại khu vực đô thị, nơi chịu ảnh hưởng mạnh từ các nguồn phát thải như giao thông, công nghiệp. Ngoài ra, kết quả từ nghiên cứu cũng có thể làm nền tảng cho việc xây dựng cơ sở dữ liệu về Hg trong môi trường không khí, hỗ trợ mô hình hóa chu trình Hg và đánh giá rủi ro sức khỏe một cách toàn diện hơn. Việc triển khai rộng rãi phương pháp này sẽ đóng góp đáng kể vào việc cung cấp dữ liệu khoa học đáng tin cậy cho các cơ quan quản lý, hỗ trợ xây dựng chính sách kiểm soát phát thải phù hợp với điều kiện thực tế tại Việt Nam. Đồng thời, nghiên cứu góp phần nâng cao năng lực phân tích của các phòng thí nghiệm trong nước, phục vụ việc thực hiện các cam kết quốc tế như Công ước Minamata về Hg.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) thông qua đề tài mã số 105.08-2024.13

XUNG ĐỘT LỢI ÍCH

Nhóm tác giả xin cam đoan rằng không có bất kỳ xung đột lợi ích nào trong công bố bài báo.

ĐÓNG GÓP CỦA CÁC TÁC GIẢ

Tác giả Phạm Thị Diệu Hương phân tích dữ liệu, viết bản thảo đầu tiên.

Tác giả Nguyễn Thị Thúy thực hiện các thí nghiệm góp ý và hoàn thiện nội dung cho bản thảo.

Tác giả Lê Quốc Hậu góp ý và hoàn thiện nội dung cho bản thảo

Tác giả Nguyễn Thị Thanh Thảo góp ý và hoàn thiện nội dung cho bản thảo

Tác giả Tô Thị Hiền góp ý và hoàn thiện nội dung cho bản thảo

Tác giả Nguyễn Lý Sỹ Phú thiết kế và giám sát các thí nghiệm, viết bản thảo đầu tiên.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Driscoll CT, Mason RP, Chan HM, Jacob DJ, Pirrone N. Mercury as a global pollutant: sources, pathways, and effects. *Environmental Science & Technology*. 2013;47(10):4967–83. Available from: <https://doi.org/10.1021/es305071v>.
2. United Nations Environment Programme. Global Mercury Assessment 2018. Nairobi (KE): UNEP; 2019.
3. Evers DC, Keane SE, Basu N, Buck D. Evaluating the effectiveness of the Minamata Convention on Mercury: principles and recommendations for next steps. *The Science of the Total Environment*. 2016;569-570:888–903. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.001>.
4. United Nations Environment Programme. Global mercury assessment 2013: sources, emissions, releases and environmental transport. Geneva (CH): UNEP Chemicals Branch. Report No.: 42; 2013.
5. Obrist D, Kirk JL, Zhang L, Sunderland EM, Jiskra M, Selin NE. A review of global environmental mercury processes in response to human and natural perturbations: changes of emissions, climate, and land use. *Ambio*. 2018;47(2):116–40. Available from: <https://doi.org/10.1007/s13280-017-1004-9>.
6. Nguyen LSP, Zhang L, Lin DW, Lin NH, Sheu GR. Eight-year dry deposition of atmospheric mercury to a tropical high mountain background site downwind of the East Asian continent. *Environmental Pollution*. 2019;255(Pt 1):113128. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113128>.
7. Gworek B, Dmochowski W, Baczewska-DAH. Mercury in the terrestrial environment: a review. *Environmental Sciences Europe*. 2020;32(1):128. Available from: <https://doi.org/10.1186/s12302-020-00401-x>.
8. Lyman SN, Cheng I, Gratz LE, Weiss-Penzias P, Zhang L. An updated review of atmospheric mercury. *The Science of the Total Environment*. 2020;707:135575. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135575>.
9. Nguyen LS, Hien TT, Truong MT, Chi ND, Sheu GR. Atmospheric particulate-bound mercury (PBM10) in a Southeast Asia megacity: sources and health risk assessment. *Chemosphere*. 2022;307(Pt 1):135707. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135707>.
10. Tang Y, Wang S, Wu Q, Liu K, Li Z, Zou J, et al. Measurement of size-fractionated particulate-bound mercury in Beijing and implications on sources and dry deposition of mercury. *The Science of the Total Environment*. 2019;675:176–83. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.245>.
11. Sheu GR, Gay DA, Schmeltz D, Olson M, Chang SC, Lin DW, et al. A New Monitoring Effort for Asia: The Asia Pacific Mercury Monitoring Network (APMMN). *Atmosphere (Basel)*. 2019;10(9):481. Available from: <https://doi.org/10.3390/atmos10090481>.
12. Gustin MS, Dunham-Cheatham SM, Lyman S, Horvat M, Gay DA, Ga J, et al. Measurement of atmospheric mercury: current limitations and suggestions for paths forward. *Environmental Science & Technology*. 2024;58(29):12853–64. Available from: <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c06011>.
13. Luippold A, Gustin MS, Dunham-Cheatham SM, Zhang L. Improvement of quantification and identification of atmospheric reactive mercury. *Atmospheric Environment*. 2020;224:117307. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117307>.
14. Ie IR, Yuan CS, Lee CE, Chiang KC, Chen TW, Soong KY. Chemical significance of atmospheric mercury at fishing port compared to urban and suburb in an offshore island. *Atmospheric Pollution Research*. 2022;13(9). Available from: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101538>.
15. U.S. Environmental Protection Agency. IO Compendium Method IO-5: Compendium of Methods for the Determination of Inorganic Compounds in Ambient Air: Sampling and Analysis for Vapor and Particle Phase Mercury in Ambient Air Utilizing Cold Vapor Atomic Fluorescence Spectrometry (CVAFS). EPA/625/R-96/010a. Cincinnati (OH): U.S. EPA; 1999.

16. Bamford HA, Bezabeh DZ, Schantz S, Wise SA, Baker JE. Determination and comparison of nitrated-polycyclic aromatic hydrocarbons measured in air and diesel particulate reference materials. *Chemosphere*. 2003;50(5):575–87. Available from: [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(02\)00667-7](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(02)00667-7).
17. Zeisler R, Murphy KE, Becker DA, Davis WC, Kelly WR, Long SE, et al. Standard reference materials (SRMs) for measurement of inorganic environmental contaminants. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2006;386(4):1137–51. Available from: <https://doi.org/10.1007/s00216-006-0785-7>.
18. Zhang H, Fu X, Wang X, Feng X. Measurements and distribution of atmospheric particulate-bound mercury: A review. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 2019;103(1):48–54. Available from: <https://doi.org/10.1007/s00128-019-02663-5>.
19. U.S. Environmental Protection Agency. Method 7473: Mercury in solids and solutions by thermal decomposition, amalgamation, and atomic absorption spectrophotometry. [cited 2025 April 22]. ; 2007. Available from: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/7473.pdf>.

Open Access Full Text Article

Investigation and optimization of the analytical procedure for total mercury in particulate matter using chemical digestion with BrCl

Thi Dieu Huong Pham^{1,2}, Thi Thuy Nguyen^{1,2}, Quoc Hau Le^{1,2}, Thi Thanh Thao Nguyen^{1,2}, Thi Hien To^{1,2}, Ly Sy Phu Nguyen^{1,2,*}



Use your smartphone to scan this QR code and download this article

¹Faculty of Environment, University of Science, Ho Chi Minh City, Vietnam

²Vietnam National University, Ho Chi Minh City, Vietnam

Correspondence

Ly Sy Phu Nguyen, Faculty of Environment, University of Science, Ho Chi Minh City, Vietnam

Vietnam National University, Ho Chi Minh City, Vietnam

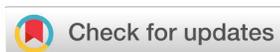
Email: nlsphu@hcmus.edu.vn

History

- Received: 04-07-2025
- Revised: 25-7-2025
- Accepted: 26-8-2025
- Published Online: 16-01-2026

DOI :

<https://doi.org/10.32508/stdjsee.v10i1.828>



Copyright

© VNUHCM Press. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International license.



ABSTRACT

Mercury (Hg) is a highly toxic heavy metal with a complex biogeochemical cycle, especially atmospheric Hg, as it can exist in both particulate and gaseous phases. Although US-EPA Method IO-5 has been widely applied for atmospheric Hg monitoring, it only provides recommendation and lacks details on procedural steps. Therefore, this study aimed to investigate and optimize the PBM analysis protocol using chemical digestion based on the IO-5 guideline, utilizing a WA-5F instrument (NIC, Japan). The results showed that the method detection limit (MDL) reached 0.22 pg/m³, which is sensitive enough for PBM analysis under various environmental conditions. Blank sample analyses indicated low and precise controlled background contamination. The repeatability of the procedure showed a coefficient of variation (CV) mostly below 20%, conforming to the requirements according to reference values from major global Hg monitoring networks. Recovery rates ranged from 84.6-101.6% (average 92.2 ± 6.8%) for spiked samples and 99.8% for certified reference materials, demonstrating the reliability of the procedure. Furthermore, the BrCl oxidizing agent was capable of extracting almost all Hg in a single sample treatment. A comparison with the direct thermal decomposition method using the MA-3 Solo instrument showed a high correlation ($R^2 = 0.96$), confirming the accuracy and practical applicability of the developed method. The research results contribute to establishing an effective analytical procedure for Hg monitoring in the atmosphere and provide crucial scientific data for assessing health risks from PBM exposure in the context of increasing urban pollution.

Key words: Mercury, particulate matter, IO-5, BrCl, recovery efficiency

Cite this article : Pham T D H, Nguyen T T, Le Q H, Nguyen T T T, To T H, Nguyen L S P. **Investigation and optimization of the analytical procedure for total mercury in particulate matter using chemical digestion with BrCl.** *Sci. Tech. Dev. J. - Sci. Earth Environ.* 2026; 10(1):1194-1203.