

ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI
TRƯỜNG ĐẠI HỌC KHOA HỌC TỰ NHIÊN

Phùng Thị Vĩ

NGHIÊN CỨU MỨC ĐỘ Ô NHIỄM CỦA
CÁC HỢP CHẤT HYDROCARBON PERFLUOR HÓA (PFC)
TRONG MÔI TRƯỜNG LÀNG NGHỀ TÁI CHẾ GIẤY VÀ
KHẢ NĂNG XỬ LÝ Ô NHIỄM BẰNG
BÈO TÂY (*Eichhornia crassipes*)

Chuyên ngành: Hóa môi trường

Mã số: 9440112.05

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ HÓA HỌC

Hà Nội – 2025

Công trình được hoàn thành tại Trường Đại học Khoa học Tự nhiên,
Đại học Quốc gia Hà Nội

Người hướng dẫn khoa học: PGS.TS. Dương Hồng Anh
GS.TS. Phạm Hùng Việt

Phản biện: GS.TS. Trần Đức Hạ

Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

Phản biện: PGS.TS. Lê Thị Phương Quỳnh

Viện Hóa học, Viện Hàn lâm KHCNVN

Phản biện: PGS.TS. Lê Thị Trinh

Trường Đại học Tài nguyên và Môi trường HN

Luận án đã được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ họp
tại Trường Đại học Khoa học Tự nhiên - ĐHQGHN vào hồi 9 giờ 00
ngày 22 tháng 11 năm 2025

Có thể tìm hiểu luận án tại:

- Thư viện Quốc gia Việt Nam;
- Trung tâm Thư viện và Tri thức số, Đại học Quốc gia Hà Nội

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết của luận án

Các hợp chất peflo hóa (PFC) là nhóm hóa chất tổng hợp chứa flo được sử dụng rộng rãi trong các ứng dụng tiêu dùng và công nghiệp. Do cấu trúc hóa học đặc biệt vừa ưa dầu vừa ưa nước nên các hóa chất này có nhiều ứng dụng bao gồm lớp phủ cho giấy, bao bì, thảm, quần áo; lớp phủ chống dính cho đồ dùng nhà bếp; chất hoạt động bề mặt công nghiệp và sản xuất bột chống cháy. Những hóa chất này đem lại lợi ích lớn cho các quá trình sản xuất công nghiệp nhưng những phát hiện sau đó đã đẩy lên lo ngại bởi độc tính, sự bền vững, khả năng phát tán xa và tích tụ sinh học cao của chúng trong môi trường. Mặc dù được sản xuất và sử dụng từ cuối những năm 1940 nhưng đến năm 2001, các hợp chất PFC mới được phát hiện lần đầu tiên trong động vật hoang dã như cá biển, chim, đại bàng và gấu Bắc cực từ những vùng xa xôi nơi ít có hoạt động của con người.

Nghiên cứu trong nhiều thập kỷ qua đã cho thấy sự có mặt của PFC trong tất cả các thành phần môi trường bao gồm nước mặt, nước ngầm, không khí, trầm tích và sinh vật. Ngoài ra, chúng còn được phát hiện trong mẫu máu người, nước tiểu, huyết thanh và sữa mẹ. Điều đáng nói là các hợp chất PFC được chứng minh có liên quan đến ung thư tinh hoàn, ung thư thận, rối loạn chức năng tuyến giáp, tổn thương gan và suy giảm khả năng sinh sản. Trong số hàng nghìn hóa chất thuộc nhóm PFC, perfluorooctanoic acid (PFOA), axit perfluorooctanesulfonic (PFOS) và axit perfluorohexane sulfonic (PFHxS) là những hợp chất phổ biến và được quan tâm nhiều nhất do độc tính và khả năng tồn tại lâu dài của chúng trong môi trường. Năm 2009, PFOS, các muối của nó và perfluorooctane sulfonyl fluoride

(PFOSF) được bổ sung vào Phụ lục B (các chất cần hạn chế sản xuất và sử dụng) theo Công ước Stockholm. Năm 2019 và 2022, PFOA, PFHxS, các muối của chúng và các hợp chất có liên quan lần lượt được bổ sung vào Phụ lục A (các chất cần được loại bỏ) theo Công ước Stockholm.

Hoạt động sản xuất tại làng nghề truyền thống từ lâu đã đóng vai trò không nhỏ trong việc phát triển kinh tế và gìn giữ nét văn hóa của đất nước. Những làng nghề này không chỉ duy trì và phát huy nghề thủ công truyền thống mà còn góp phần giải quyết vấn đề việc làm và cải thiện thu nhập cho người dân địa phương. Tuy nhiên, sự phát triển nhanh chóng và mở rộng quy mô sản xuất tại một số làng nghề trong thời gian gần đây đã dẫn đến những vấn đề nghiêm trọng về ô nhiễm môi trường. Làng nghề tái chế giấy Phong Khê, Bắc Ninh là một ví dụ điển hình, đây là làng nghề tái chế giấy lớn nhất miền Bắc, cung cấp đa dạng các sản phẩm từ giấy cho thị trường nội địa. Mặc dù ở đây có nhà máy xử lý nước thải tập trung nhưng nhiều cơ sở sản xuất để tiết kiệm chi phí vẫn cố ý xả thải trực tiếp ra môi trường khiến khu vực xung quanh, trong đó có sông Ngũ Huyện Khê ô nhiễm nghiêm trọng. Đáng chú ý, trong ngành công nghiệp sản xuất giấy, các hợp chất PFC thường được sử dụng để cải thiện tính chống nước và chống dầu của giấy. Các hợp chất này có thể bị thải ra trong quá trình sản xuất và tái chế giấy, tiếp tục xâm nhập vào môi trường nước, trầm tích và tích lũy trong các sinh vật. Con người – một mắt xích trong chuỗi thức ăn có thể bị phơi nhiễm các hợp chất này khi tiêu thụ nước và cá, tiềm ẩn nguy cơ ảnh hưởng đến sức khỏe.

Từ bức tranh về sự ô nhiễm toàn cầu và tác động tiêu cực của các hợp chất PFC đối với hệ sinh thái và sức khỏe con người, việc xử lý các hợp chất PFC đang nhận được nhiều sự quan tâm của cộng

đồng khoa học quốc tế trong những năm gần đây. Các phương pháp xử lý hóa học đem lại hiệu quả xử lý cao, dễ thực hiện nhưng chi phí lớn và tiêu tốn nhiều hóa chất trong khi xử lý sinh học sử dụng thực vật là một phương pháp tương đối hiệu quả, tiết kiệm và thân thiện với môi trường. Kết quả của một số nghiên cứu trên thế giới đã cho thấy khả năng tích lũy tốt của các hợp chất PFC trong một số loài thực vật như cỏ, cỏ năng, lau sậy, rau muống nước và cỏ bấc. Tại Việt Nam, bèo tây là một loại thực vật thủy sinh phổ biến, được ứng dụng rộng rãi trong xử lý nước thải ô nhiễm có thể là vật liệu sinh học tiềm năng để hấp thu các hợp chất PFC trong nước.

Trong bối cảnh vấn đề ô nhiễm môi trường đang trở thành thách thức lớn đối với sự phát triển bền vững của các làng nghề truyền thống, việc triển khai các nghiên cứu toàn diện nhằm tìm hiểu rõ hiện trạng ô nhiễm môi trường tại khu vực làng nghề, đặc biệt là ô nhiễm nhóm hợp chất PFC và đề xuất giải pháp xử lý hiệu quả là rất cần thiết. Xuất phát từ thực tiễn trên, em lựa chọn và tiến hành luận án tiến sĩ với tên đề tài **“Nghiên cứu mức độ ô nhiễm của các hợp chất hydrocarbon perfluor hóa (PFC) trong môi trường làng nghề tái chế giấy và khả năng xử lý ô nhiễm bằng bèo tây (*Eichhornia crassipes*)”**.

2. Mục tiêu nghiên cứu

- Đánh giá hiện trạng ô nhiễm và thành phần các hợp chất perfluor hóa (PFC) trong nước mặt, trầm tích, nước ngầm và cá nước ngọt tại khu vực làng nghề tái chế giấy Phong Khê, Bắc Ninh.
- Đánh giá rủi ro sinh thái từ ô nhiễm nước mặt và đánh giá rủi ro sức khỏe con người từ ô nhiễm nước ngầm và cá.
- Đánh giá khả năng tích lũy sinh học và triển vọng sử dụng cây bèo tây để xử lý nước ô nhiễm các hợp chất PFC.

3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

3.1. Đối tượng nghiên cứu

- Các hợp chất PFC trong các thành phần môi trường nước mặt, trầm tích, nước ngầm và cá nước ngọt.

3.2. Phạm vi nghiên cứu

- Nghiên cứu tập trung vào khu vực làng nghề tái chế giấy Phong Khê, Bắc Ninh. Đây là một khu vực đặc thù với hoạt động tái chế giấy, tiềm năng phát thải ô nhiễm các hợp chất PFC.

- Các mẫu nước mặt và trầm tích được thu thập từ sông Cầu, sông Ngũ Huyện Khê; nước ngầm được lấy từ các hộ gia đình và cá nước ngọt từ sông Cầu và khu vực Phong Khê.

4. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của luận án

4.1. Ý nghĩa khoa học của luận án

- Đóng góp dữ liệu mới và chi tiết về hiện trạng ô nhiễm và thành phần của các hợp chất PFC trong các thành phần môi trường khác nhau bao gồm nước mặt, trầm tích, nước ngầm và cá nước ngọt tại khu vực làng nghề tái chế giấy Phong Khê - một nguồn tiềm năng phát thải PFC tại Việt Nam.

- Cung cấp thông tin về đánh giá rủi ro sinh thái và rủi ro sức khỏe con người từ sự tích lũy của các hợp chất PFC trong môi trường.

- Cung cấp cơ sở khoa học về khả năng tích lũy và hiệu quả xử lý ô nhiễm các hợp chất PFC trong nước sử dụng cây bèo tây.

4.2. Ý nghĩa thực tiễn của luận án

- Kết quả nghiên cứu của luận án cung cấp thông tin về hiện trạng ô nhiễm các hợp chất PFC tại khu vực làng nghề tái chế giấy, đóng góp dữ liệu phục vụ xây dựng quy chuẩn kỹ thuật về giới hạn nồng độ các hợp chất này trong nguyên liệu và sản phẩm tiêu dùng.

- Các hợp chất PFC được biết đến có thể gây ra tác động tiêu cực đến hệ sinh thái và sức khỏe con người. Kết quả nghiên cứu của luận án góp phần cung cấp dữ liệu cho người dân về sự tích lũy của các hợp chất PFC – một trong các hợp chất ô nhiễm hữu cơ khó phân hủy trong nước ngầm và cá.

- Những thông tin bước đầu về hiệu quả sử dụng cây bèo tây trong xử lý nước ô nhiễm các hợp chất PFC mở ra tiềm năng phát triển các công nghệ xử lý nước bằng vật liệu sinh học có giá thành rẻ và dễ áp dụng.

5. Những đóng góp mới của luận án

- Luận án cung cấp dữ liệu toàn diện về hiện trạng ô nhiễm các hợp chất PFC trong các thành phần môi trường khác nhau tại khu vực làng nghề tái chế giấy Phong Khê, Bắc Ninh mà tính đến nay chưa có nghiên cứu nào được thực hiện. Ngoài ra, nghiên cứu đã thực hiện đánh giá rủi ro sinh thái và sức khỏe con người từ việc ô nhiễm các hợp chất PFC. Bên cạnh đó, luận án được coi là nghiên cứu đầu tiên khảo sát khả năng sử dụng cây bèo tây để xử lý nước ô nhiễm các hợp chất PFC tại Việt Nam.

6. Bố cục của luận án

Luận án gồm 171 trang chưa kể phụ lục, trong đó có 15 bảng số liệu và 46 hình vẽ, 169 tài liệu tham khảo. Bố cục của luận án: Mở đầu (4 trang); Chương 1: Tổng quan (49 trang); Chương 2: Thực nghiệm (21 trang); Chương 3: Kết quả và Thảo luận (63 trang); Kết luận và kiến nghị (2 trang); Tài liệu tham khảo (19 trang). Ngoài ra còn có Phụ lục (43 trang) và danh mục 04 công trình đã công bố (1 trang).

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN

Phần tổng quan của luận án tập trung đề cập đến những khái niệm về các hợp chất PFC, lịch sử sản xuất và sử dụng của các hợp chất PFC. Ngoài ra, đặc tính hóa lý của các hợp chất PFC, độc tính của các hợp chất PFC và các con đường phơi nhiễm ở người cũng được khái quát trong phần tổng quan của luận án. Bên cạnh đó, phần tổng quan còn đề cập đến hiện trạng ô nhiễm các hợp chất PFC trong môi trường thủy quyển (nước ngầm, nước mặt, trầm tích và cá). Các phương pháp loại bỏ nhóm hợp chất PFC trong nước bao gồm phương pháp hóa lý và phương pháp sinh học cũng được tổng hợp. Tổng quan về khu vực nghiên cứu được đề cập trong phần cuối cùng của tổng quan.

CHƯƠNG II: THỰC NGHIỆM

Luận án đã trình bày chi tiết về đối tượng và phạm vi nghiên cứu, các phương pháp nghiên cứu được sử dụng để thực hiện luận án.

- Phương pháp thu thập và xử lý mẫu
- Phương pháp phân tích mẫu sử dụng phương pháp sắc ký lỏng ghép nối khối phổ hai lần LC-MS/MS
- Phương pháp đánh giá sự có mặt và tích lũy PFC từ môi trường nước vào trầm tích và bèo tây dựa trên hệ số nồng độ sinh học và hệ số chuyển vị (đối với các bộ phận của bèo tây).
- Phương pháp đánh giá rủi ro sinh thái từ sự ô nhiễm các hợp chất PFC gây ra cho các loại sinh vật thủy sinh dựa trên chỉ số rủi ro sinh thái.

- Phương pháp đánh giá rủi ro sức khỏe từ sự ô nhiễm PFC trong nước ngầm và cá
- Phương pháp xử lý số liệu

CHƯƠNG 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Sự có mặt của PFC trong nước mặt và rủi ro tới hệ sinh thái nước tại khu vực Phong Khê

3.1.1. Nồng độ và thành phần của PFC trong nước mặt

Là những chất có tần suất phát hiện cao nhất khi được tìm thấy ở cả hai mùa, các PFC với số C $\leq$ 8 cũng là những chất có nồng độ trong nước mặt cao nhất. Cụ thể, nồng độ trung bình chung của PFOA trong cả hai mùa là 4,144 ng/L (với trung vị là 2,581 ng/L và khoảng nồng độ dao động từ KPH – 16,25 ng/L), tiếp theo là PFHxA (trung bình: 4,032 ng/L, trung vị: 2,054 ng/L; khoảng nồng độ: KPH – 15,93 ng/L), PFHxS (trung bình: 2,938 ng/L; trung vị: 1,266 ng/L; khoảng nồng độ: KPH – 12,96 ng/L), PFOS (trung bình: 1,857 ng/L; trung vị: 2,014 ng/L; khoảng nồng độ: KPH – 3,640 ng/L) và PFHpA (trung bình: 1,048 ng/L; trung vị: 0,761 ng/L và khoảng nồng độ: KPH – 4,805 ng/L). Đáng lưu ý, nồng độ trung bình của PFDS rất cao trong mùa khô (6,718 ng/L) nhưng thấp hơn đáng kể trong mùa mưa (0,031 ng/L) và trung bình chung cho hai mùa là 3,374 ng/L (trung vị: KPH ng/L). Nguyên nhân là do trong số 08 mẫu nước mặt mùa khô phát hiện được PFDS, có 04 mẫu (PK.SW.16-19) có nồng độ PFDS rất cao trong khoảng từ 7,608 – 63,54 ng/L, trong khi các mẫu còn lại có nồng độ thấp hơn nhiều, từ KPH – 2,464 ng/L. Các mẫu có nồng độ cao này được thu thập trên kênh dẫn nước thải từ các

cơ sở sản xuất giấy ra sông Ngũ Huyện Khê, cho thấy nước thải từ hoạt động sản xuất giấy có thể là một nguồn ô nhiễm PFC đáng kể. Các hợp chất mạch dài được phát hiện khác, gồm các PFCA với C9 - C14, chỉ được tìm thấy với nồng độ khá thấp, nằm trong khoảng KPH – 3,995 ng/L và giá trị nồng độ trung bình chung ở cả hai mùa từ 0,016 – 0,757 ng/L (trung vị: KPH – 0,364 ng/L).

3.1.2. Sự biến đổi nồng độ PFC trong nước mặt theo không gian và thời gian

Nồng độ PFC được tìm thấy trong các mẫu nước mương thải cũng cao hơn so với nước sông Ngũ Huyện Khê và sông Cầu. Tính chung cho cả hai mùa, giá trị trung vị của tổng PFC trong các mẫu nước mương thải là 41,69 ng/L (trung bình: 45,12 ng/L; khoảng nồng độ: 22,18 – 88,38 ng/L), trong khi giá trị trung vị đối với các mẫu nước sông Ngũ Huyện Khê là 9,385 ng/L (trung bình: 15,30 ng/L; khoảng nồng độ: 6,723 – 49,02 ng/L) và sông Cầu là 2,405 ng/L (trung bình: 3,180 ng/L; khoảng nồng độ: KPH – 9,416 ng/L). Phân tích Kruskal-Wallis H test được sử dụng để xác định sự khác biệt về tổng PFC của ba nhóm vị trí lấy mẫu khác nhau (sông Cầu (n = 12), sông Ngũ Huyện Khê (n = 18) và mương thải (n = 10)). Kết quả cho thấy sự khác biệt về tổng PFC của các cặp vị trí đều có ý nghĩa thống kê (sông Cầu – mương thải: $p < 0,001$; sông Cầu – sông Ngũ Huyện Khê: $p = 0,009$; và sông Ngũ Huyện Khê – mương thải: $p = 0,010$). Sự khác biệt có ý nghĩa thống kê tương tự ($p < 0,05$) cũng được tìm thấy đối với tổng PFCA và PFSA của các mẫu mương thải so với các mẫu sông Ngũ Huyện Khê và sông Cầu.

Khi xem xét theo từng mùa, sự biến đổi là phức tạp hơn. Cụ thể, trong mùa khô, tổng nồng độ PFC trong các mẫu nước sông Cầu

(trung bình: 4,117 ng/L; trung vị: 3,096 ng/L) thấp hơn đáng kể so với giá trị tìm được của các mẫu nước sông Ngũ Huyện Khê (trung bình: 21,00 ng/L; trung vị: 16,77 ng/L; $p = 0,038$) và nương thái (trung bình: 48,36 ng/L; trung vị: 41,32 ng/L; $p = 0,001$) nhưng sự khác biệt về tổng PFC giữa các mẫu sông Ngũ Huyện Khê và nương thái là không có ý nghĩa về mặt thống kê ($p = 0,277$). Tuy nhiên, vào mùa mưa, tổng PFC trong các mẫu nước sông Cầu (trung bình: 2,243 ng/L; trung vị: 1,212 ng/L) chỉ thấp hơn đáng kể so với nồng độ tìm thấy trong nương thái (trung bình: 41,89 ng/L; trung vị: 42,05 ng/L; $p = 0,001$), trong khi không có sự khác biệt có ý nghĩa thống kê khi so sánh với các mẫu của sông Ngũ Huyện Khê (trung bình: 9,606 ng/L; trung vị: 8,038 ng/L; $p = 0,271$). Bên cạnh đó, tổng PFC của các mẫu nước sông Ngũ Huyện Khê nằm trên ranh giới khác biệt so với các mẫu nương thái ($p = 0,050$). Các kết luận tương tự cũng được tìm thấy khi so sánh tổng nồng độ PFCA và PFSA giữa ba khu vực lấy mẫu.

Khi xem xét theo các nhóm địa điểm lấy mẫu khác nhau, không có sự khác biệt có ý nghĩa thống kê về tổng PFC ($p > 0,05$) của các mẫu sông Cầu hoặc nương thái giữa mùa khô (trung bình: 4,117 và 48,35 ng/L; trung vị: 3,096 và 41,32 ng/L tương ứng) và mùa mưa (trung bình: 2,243 và 41,89 ng/L; trung vị: 1,212 và 42,05 ng/L tương ứng), tuy nhiên tổng PFC trong các mẫu sông Ngũ Huyện Khê mùa khô (trung bình: 21,00 ng/L; trung vị: 16,77 ng/L) cao hơn đáng kể ($p = 0,008$) so với các mẫu mùa mưa (trung bình: 9,606 ng/L; trung vị: 8,038 ng/L). Vị trí lấy mẫu thuộc sông Ngũ Huyện Khê cũng là nơi có sự khác biệt có ý nghĩa thống kê về tổng PFCA ($p = 0,039$) và PFSA ($p = 0,008$) giữa mùa khô (trung bình: 14,11 và 6,885 ng/L;

trung vị: 11,630 và 6,771 ng/L tương ứng) và mùa mưa (trung bình: 6,946 và 2,660 ng/L; trung vị: 5,537 và 2,669 ng/L tương ứng). Ngược lại, không có sự khác biệt đáng kể ($p > 0,05$) về tổng PFCA và PFSA giữa hai mùa đối với các mẫu sông Cầu.

Mặc dù có mức độ ô nhiễm PFC cao hơn so với nước mặt tại các địa điểm khác ở Việt Nam, tổng PFC thu được trong nghiên cứu này thấp hơn nhiều so với nồng độ tìm thấy trong nước mặt tại các lưu vực sông khác trên thế giới. Có thể thấy nồng độ PFC trong nước mặt được phát hiện cao hơn nhiều tại các khu vực gần các nhà máy sản xuất công nghiệp hóa chất như Changsu, Trung Quốc (7,0 – 489 ng/L); sông Yuqiao, Trung Quốc (5,8 – 120,9 ng/L). Đặc biệt, nồng độ của các hợp chất được đưa vào danh mục hạn chế (PFOS) và loại bỏ (PFOA và PFHxS) trong sản xuất và sử dụng theo Công ước Stockholm trong nghiên cứu này thấp hơn nhiều so với nồng độ tìm thấy trong nước mặt tại một số khu vực đặc thù khác trên thế giới.

3.1.3. Đánh giá rủi ro sinh thái từ việc phơi nhiễm các PFC trong nước mặt

Kết quả phân tích rủi ro sinh thái cho thấy phần lớn các giá trị đều nằm trong ngưỡng an toàn đối với các nhóm sinh vật thủy sinh, thể hiện qua màu xanh trên bảng dữ liệu. Đối với các hợp chất PFHxA, PFHpA, PFDoA và PFOS, giá trị RQ tại tất cả các nhóm điểm ở cả hai mùa khô và mùa mưa đều nhỏ hơn 0,01 cho thấy chúng không gây rủi ro cho các loài sinh vật được đánh giá bao gồm các sinh vật phù du *Daphnia magna*, *Moina macrocopa*, *Moina micrura* và *Brachionus calyciflorus*. Tuy nhiên, một số hợp chất như PFOA, PFNA, PFDA và PFUnDA bắt đầu xuất hiện giá trị vượt ngưỡng an toàn sinh thái ở một số loài nhạy cảm, phản ánh qua các ô màu cam

tương ứng với mức rủi ro thấp đến trung bình. Đặc biệt, loài *Chironomus plumosus* liên tục ghi nhận các giá trị trong ngưỡng rủi ro thấp và trung bình (0,02 – 0,1) đối với PFOA tại sông Ngũ Huyện Khê và mương nước ở cả hai mùa; mức rủi ro thấp (0,01 – 0,02) đối với PFNA tại sông Cầu và sông Ngũ Huyện Khê vào mùa khô, mương nước ở cả hai mùa. PFDA và PFUnDA trong mương nước vào mùa mưa cũng gây rủi ro thấp cho *Chironomus plumosus*. Bên cạnh đó, PFOA trong nước sông Ngũ Huyện Khê (mùa khô) và mương nước (cả hai mùa) còn cho thấy khả năng gây rủi ro ở mức thấp cho loài giáp xác *Moina micrura*. Kết quả của nghiên cứu này cho thấy mức rủi ro thấp gây ra bởi PFUnDA đối với loài *Cyprinus carpio* tại tất cả các điểm ngoại trừ sông Cầu vào mùa khô.

3.2. Sự có mặt của các PFC trong nước ngầm và rủi ro tới sức khỏe con người tại khu vực Phong Khê

3.2.1. Sự có mặt của các PFC trong nước ngầm

Là những chất có tần suất phát hiện cao nhất khi được tìm thấy tại khu vực Phong Khê ở cả hai mùa, các PFC với số C $\leq$ 8 cũng là những chất có nồng độ cao nhất trong nước ngầm. Cụ thể, PFOA có nồng độ trung bình chung trong cả hai mùa là 0,919 ng/L (với trung vị là 0,514 ng/L và khoảng nồng độ dao động từ KPH – 2,745 ng/L), tiếp theo là PFHxA (trung bình: 0,830 ng/L, trung vị: 0,530 ng/L; khoảng nồng độ: KPH – 6,187 ng/L), PFHpA (trung bình: 0,593 ng/L; trung vị: 0,256 ng/L; khoảng nồng độ: KPH – 6,807 ng/L), PFHxS (trung bình: 0,217 ng/L; trung vị: KPH; khoảng nồng độ: KPH – 0,902 ng/L) và PFOS (trung bình: 0,146 ng/L; trung vị: 0,00 ng/L; khoảng nồng độ: KPH – 0,689 ng/L). Bốn hợp chất mạch dài được phát hiện khác, bao gồm PFNA, PFDoDA, PFTrDA và

PFTeDA, chỉ được tìm thấy với nồng độ rất thấp, nằm trong khoảng KPH – 1,421 ng/L với giá trị nồng độ trung bình chung ở cả hai mùa từ 0,009 – 0,052 ng/L và giá trị trung vị đều là KPH.

3.2.2. Sự biến đổi nồng độ PFC trong nước ngầm theo không gian và thời gian

Các mẫu nước ngầm PK.GW.01 – 12 được lấy từ các giếng tại khu vực nằm ở phía Nam sông Ngũ Huyện Khê, nơi tập trung của các cơ sở sản xuất giấy; ngược lại, các mẫu PK.GW.13 – 25 được thu thập từ các giếng nằm ở phía Bắc của sông Ngũ Huyện Khê, khu vực chủ yếu là các hộ gia đình và không tham gia vào hoạt động sản xuất giấy. Nhìn chung, các mẫu phía Nam sông có tần suất phát hiện PFC cao hơn các mẫu phía Bắc sông ở cả hai mùa. Cụ thể, vào mùa khô, chỉ có 1/10 mẫu (chiếm 10,0% số mẫu) thuộc khu vực phía Nam sông (mẫu PK.GW.05) không phát hiện được PFC, trong khi không có hợp chất nào được tìm thấy trong 2/8 mẫu (chiếm 25,0% số mẫu) thuộc khu vực phía Bắc sông (các mẫu PK.GW.18 và PK.GW.20). Tương tự, PFC được tìm thấy trong tất cả 11 mẫu ở khu vực phía Nam trong mùa mưa, trong khi có tới 6/11 mẫu (chiếm 54,5% số mẫu) ở khu vực phía Bắc không phát hiện được bất kì PFC nào (các mẫu PK.GW.16, 17, 19, 23-25).

Kiểm tra sự khác biệt về tổng nồng độ PFC, PFCA và PFSA giữa hai mùa bằng kiểm định Mann-Whitney U cho thấy, tổng PFC và PFCA trong các mẫu nước ngầm thu thập vào mùa mưa (trung bình: 2,841 ng/L và 2,788 ng/L; trung vị: 2,897 ng/L và 2,897 ng/L) cao hơn không đáng kể so với giá trị xác định được trong các mẫu mùa khô (trung bình: 2,784 ng/L và 2,043 ng/L; trung vị: 1,868 ng/L và 0,876 ng/L tương ứng) nhưng các sự khác biệt này không có ý

nghĩa thống kê ($p > 0,05$). Ngược lại, tổng nồng độ PFSA tìm thấy trong các mẫu mùa khô (trung bình: 0,740 ng/L; trung vị: 0,751 ng/L) cao hơn đáng kể ($p = 0,001$) so với giá trị tìm được của các mẫu mùa mưa (trung bình: 0,053 ng/L; trung vị: KPH).

3.2.3. Đánh giá nguồn gốc các PFC trong nước ngầm

Kết quả phân tích phương pháp PCA cho thấy sự khác biệt tương đối rõ ràng giữa các thành phần của mẫu nước ngầm thu được trong mùa khô và mùa mưa. Hầu hết các mẫu mùa khô được phân bố dọc theo PC2, cho thấy các PFSA trở nên chiếm ưu thế trong nước ngầm trong mùa khô. Ngược lại, nồng độ của các PFCA cao hơn trong các mẫu nước ngầm của mùa mưa. Điều này cho thấy sự khác biệt về nguồn gốc của các PFC trong nước ngầm giữa hai mùa. Nhìn chung, các mẫu nước ngầm ở khu vực Phong Khê cho thấy giá trị tỉ lệ tổng (PFHxA + PFHpA)/PFOA thu được ở mùa khô (2,33) cao hơn ở mùa mưa (1,69) và phía Bắc sông Ngũ Huyện Khê (1,94) cao hơn phía Nam sông (1,92). Kết quả này chỉ ra rằng nước ngầm ở khu vực Phong Khê chịu tác động ô nhiễm PFC chủ yếu từ cả hoạt động của con người và khu vực phía Nam chịu tác động mạnh hơn phía Bắc.

3.2.4. Đánh giá rủi ro sức khỏe cho con người từ việc phơi nhiễm các PFC trong nước ngầm

Trong nghiên cứu này, lượng PFC trung bình hấp thụ vào cơ thể người và giá trị tỉ lệ nguy cơ (HR) thông qua việc tiêu thụ nước ngầm được tính toán dựa trên nồng độ PFC được tìm thấy trong các mẫu được phân tích. Tổng nồng độ trung bình của PFCA và PFSA trong cả hai mùa lần lượt là 2,52 ng/L và 0,37 ng/L. Liều lượng tiếp xúc hàng ngày trung bình (ADI) đối với người trưởng thành từ nước

ngâm là 0,07 (ng/kg/ngày), với giá trị ADI đối với PFOA và PFOS lần lượt là 0,029 ng/kg/ngày và 0,004 ng/kg/ngày. Các giá trị HR được tính toán cho tổng PFC trong nghiên cứu này đều nhỏ hơn 1,0, cho thấy nguy cơ thấp về rủi ro sức khỏe liên quan đến việc sử dụng nước ngầm trong khu vực làng nghề giấy Phong Khê.

3.3. Sự có mặt của các PFC trong trầm tích và sự phân bố pha nước – trầm tích

3.3.1. Hàm lượng PFC trong trầm tích theo không gian và theo mùa

Tổng hàm lượng PFC được tìm thấy trong trầm tích sông Cầu, sông Ngũ Huyện Khê và mương nước tại khu vực Phong Khê vào mùa khô nằm trong khoảng 0,034 – 6,320 ng/g với giá trị trung bình là 1,728 ng/g và giá trị trung vị là 0,877 ng/g. Trong số này, các PFCA có đóng góp chủ yếu vào tổng PFC trong trầm tích, chiếm 71,1%, với giá trị trung bình là 1,228 ng/g (khoảng hàm lượng: 0,034 – 5,059 ng/g và trung vị: 0,647 ng/g). Trong khi đó, tổng hàm lượng của các PFSA nằm trong khoảng từ KPH – 1,296 ng/g với giá trị trung bình và trung vị lần lượt là 0,499 và 0,323 ng/g, chiếm 28,9% của tổng hàm lượng PFC.

Tương tự như với các mẫu nước mặt trong mùa khô, tổng PFC được tìm thấy trong các mẫu trầm tích ở sông Cầu là thấp nhất (trung bình: 0,460 ng/g và trung vị: 0,428 ng/g), sau đó tới các mẫu thu thập ở sông Ngũ Huyện Khê (trung bình: 2,407 ng/g và trung vị: 0,994 ng/g) và mương nước (trung bình: 2,025 ng/g và trung vị: 2,300 ng/g). Kiểm định Kruskal-Wallis H test cũng được sử dụng để xác định sự khác biệt về tổng PFC của ba nhóm vị trí lấy mẫu khác nhau (sông Cầu (n = 5), sông Ngũ Huyện Khê (n = 10) và mương nước (n = 5)). Kết

qua cho thấy chỉ có sự khác biệt về tổng PFC của cặp vị trí sông Cầu – nương nước là đáng kể ($p = 0,048$), trong khi cặp vị trí sông Cầu – sông Ngũ Huyện Khê ở ranh giới khác biệt ($p = 0,052$) và cặp vị trí sông Ngũ Huyện Khê – nương nước không có sự khác biệt có ý nghĩa thống kê ($p = 1,000$). Sự khác biệt đáng kể cũng được tìm thấy đối với tổng PFSA của các mẫu trầm tích ở sông Cầu so với các mẫu ở sông Ngũ Huyện Khê và nương nước ($p = 0,046$ và $p = 0,029$ tương ứng), trong khi các giá trị PFCA tìm thấy giữa các nhóm vị trí lấy mẫu khác biệt không có ý nghĩa thống kê ($p > 0,050$). Các phát hiện này có sự khác biệt đôi chút so với kết quả quan sát được đối với mẫu nước mặt, khi sự khác biệt về tổng PFC và PFCA giữa các mẫu nước sông Cầu và sông Ngũ Huyện Khê là có ý nghĩa thống kê. Điều này có thể đến từ sự ảnh hưởng của quá trình vận động dòng chảy, trạng thái không cân bằng trong sự phân bố của các PFC giữa trầm tích và nước mặt, lịch sử tích lũy và các quá trình sinh địa hóa khác.

3.3.2. Thành phần của các PFC trong trầm tích

Kết quả cho thấy sự phân bố rõ rệt của một số hợp chất chuỗi dài trong trầm tích. Đáng chú ý, PFTeDA (C14) là hợp chất đóng góp lớn nhất, chiếm khoảng 32% tổng hàm lượng PFC, cho thấy xu hướng tích lũy mạnh của hợp chất này trong pha rắn. Điều này phù hợp với cơ chế phân bố của các PFCA mạch dài, vốn có khả năng tương tác mạnh với vật chất hữu cơ trong trầm tích thông qua tương tác kỵ nước và lực Van der Waals. Tiếp theo là PFTrDA (C13) và PFDS (C10) với tỉ lệ đóng góp khoảng 13%, củng cố nhận định rằng các PFC có mạch carbon dài và nhóm chức sulfonate thường có khả năng hấp phụ vượt trội so với các đồng đẳng mạch ngắn.

3.3.3. Sự phân bố pha nước – trầm tích

Hệ số phân bố giữa pha nước và trầm tích ($\log K_d$) là chỉ số quan trọng trong việc đánh giá xu hướng hấp phụ của các hợp chất PFC trong môi trường nước. Trong nghiên cứu này, $\log K_d$ của các hợp chất PFC được xác định tại các điểm lấy mẫu. Kết quả cho thấy $\log K_d$ dao động từ 0,561 đến 3,974, phản ánh sự biến động lớn về phân bố pha giữa các hợp chất. Chiều dài mạch carbon là một yếu tố ảnh hưởng rõ rệt đến $\log K_d$. Cụ thể, $\log K_d$ của các PFC mạch ngắn như PFHxA (0,561 – 2,037) và PFHpA (1,795 – 2,508) thấp hơn đáng kể so với PFUDA (2,043 – 3,974) và PFTeDA (1,912 – 3,233). Tương tự, $\log K_d$ của PFHxS (C6) thấp hơn PFOS (C8). Kết quả này khẳng định xu hướng tăng tính kỵ nước và khả năng hấp phụ theo chiều dài mạch carbon. Tuy nhiên, một số ngoại lệ ở một số mẫu được quan sát, ví dụ như $\log K_d$ của PFDS (C10) trong một số mẫu lại cao hơn $\log K_d$ của PFOS (C8) hoặc $\log K_d$ của PFUDA (C11) lại cao hơn $\log K_d$ của PFDoA (C12) và PFTeDA (C13). Điều này cho thấy ảnh hưởng đồng thời của nhóm chức và hiệu ứng cản trở lập thể (steric hindrance).

3.4. Sự ô nhiễm PFC trong cá nước ngọt và rủi ro tới sức khỏe con người thông qua việc tiêu thụ cá

3.4.1. Hiện trạng ô nhiễm PFC trong cá nước ngọt

Trong nghiên cứu này, 7/8 hợp chất PFC mục tiêu được tìm thấy trong các loài cá nước ngọt được thu thập ở khu vực Phong Khê, bao gồm PFOA, PFNA, PFDA, PFUnDA, PFDoDA, PFHxS và PFOS, trong khi PFHxA không được phát hiện trong bất kỳ mẫu cá nào. PFUnDA và PFOS là những hợp chất được tìm thấy nhiều nhất trong bảy loài cá được nghiên cứu, với tần suất phát hiện lần lượt là 97,9 và

91,5%. Ba hợp chất PFCA mạch dài là PFNA, PFDA và PFDoDA cũng được tìm thấy với tần suất từ 66,0 – 74,5%. Hai hợp chất được tìm thấy nhiều trong nước mặt là PFOA và PFHxS chỉ được phát hiện trong 17,0 và 25,5% mẫu cá. Là những hợp chất được phát hiện nhiều nhất, PFOS và PFUnDA cũng là những PFC có hàm lượng lớn nhất trong các mẫu cá với giá trị trung bình (khoảng hàm lượng) lần lượt là 0,619 (KPH – 3,524 ng/g w.w) và 0,564 (KPH – 2,871 ng/g w.w). PFOS đóng góp từ 12,9% (ở cá diếc) tới 59,7% (ở cá chép) và trung bình 36,1% trong tổng PFC tìm được, trong khi tỉ lệ đóng góp của PFUnDA trong tổng PFC trong hai loài này biến đổi theo chiều hướng ngược lại, nhỏ nhất ở cá chép (26,6%) và lớn nhất ở cá diếc (56,8%).

3.4.2. Sự biến đổi về hàm lượng PFC giữa các loài cá khác nhau

Tổng hàm lượng PFC trong bảy loài cá nước ngọt nằm trong khoảng từ 0,078 đến 8,062 ng/g khối lượng ướt (w.w) với giá trị trung vị là 1,015 ng/g w.w và hàm lượng trung bình là 1,686 ng/g w.w. Hàm lượng trung bình của tổng PFC (ng/g w.w) tăng dần theo thứ tự: diếc (0,743) < chép (0,882) < trê (1,267) < quả (1,292) < trôi (1,412) < rô phi (1,424) < thiều (7,009). Hàm lượng này thấp hơn các mức được báo cáo trên các nghiên cứu về cá nước ngọt khác, chẳng hạn ở sông Jiulong, Trung Quốc (25 – 100 ng/g w.w), các hồ ở châu Âu (0,35–60,4, trung vị 14,2 ng/g w.w) và các sông ở New Jersey, Hoa Kỳ (3,8–129,8 ng/g w.w). Mức PFC trong rô phi thu được từ nghiên cứu này cao hơn những gì được ghi nhận tại châu Phi (KPH - 0,13, trung bình 0,24 ng/g w.w).

Kết quả ANOVA Welch F6; 13,286 = 14,176 và $p < 0,001$ cho thấy sự khác biệt có ý nghĩa thống kê về PFC tổng giữa các loài cá. Phân tích sâu Games-Howell tiếp tục chỉ ra rằng tổng hàm lượng

PFC trong cá thiều lớn hơn đáng kể so với các loài khác ($p = 0,003 - 0,014$). Các kết quả tương tự cũng được quan sát thấy khi so sánh tổng PFCA và PFSA được tìm thấy trong cá thiều với các loài cá khác ($p < 0,05$). Hai loài cá trôi và cá trê đều được thu thập từ ao nuôi cá tại làng Ngô Khê và mặc dù tổng hàm lượng PFC được phát hiện trong các mẫu cá trôi cao hơn trong các mẫu cá trê, kiểm định t-test chỉ ra rằng sự khác biệt này là không có ý nghĩa thống kê ($p = 0,721$). Bên cạnh đó, các mẫu cá chép, cá diếc, cá thiều, cá quả và 50% số mẫu cá rô phi đều được đánh bắt trong tự nhiên trên sông Cầu. Ngoại trừ các mẫu cá thiều có tổng PFC cao hơn đáng kể so với hàm lượng tìm được trong các loài cá khác như đã đề cập ở trên, tổng PFC được tìm thấy trong các mẫu cá quả ($1,292 \text{ ng/g w.w}$) cũng cao hơn có ý nghĩa thống kê ($p = 0,031$) so với giá trị xác định được đối với cá rô phi ($0,555 \text{ ng/g w.w}$). Các loài này (chép, diếc, quả và rô phi) đều là các sinh vật tầng đáy và là loài ăn tạp.

3.4.3. Rủi ro tới sức khỏe con người thông qua việc tiêu thụ cá

Phơi nhiễm PFC thông qua tiêu thụ cá được tính toán bằng mô hình của Cơ quan Bảo vệ Môi trường Hoa Kỳ (EPA). Sau khi tính toán, các giá trị HR của tổng PFC trong tất cả các loài cá nước ngọt tại khu vực Phong Khê nhỏ hơn 1, dao động lần lượt từ 0,019 đến 0,238. Cần lưu ý rằng trong nghiên cứu này, các giá trị HR được tính toán dựa trên dữ liệu tiêu thụ riêng biệt của cá nước ngọt, trong khi ở các công bố khác, mức tiêu thụ cá thường được gộp chung. Do đó, các giá trị ADI và HR được tính toán trong nghiên cứu này nhỏ hơn các nghiên cứu khác do hàm lượng PFC thấp hơn cũng như mức tiêu thụ cá không đáng kể. Các phát hiện này cho thấy ngay cả khi các PFCA và PFSA khác có độc tính tương đương với PFOA và PFOS,

phơi nhiễm tích lũy PFC vẫn có thể không ảnh hưởng tiêu cực đến dân cư địa phương.

3.5. Kết quả nghiên cứu khả năng loại bỏ PFC bằng cây bèo tây

3.5.1. Sự tích lũy PFC trong các bộ phận khác nhau của cây bèo tây

Kết quả thu được trong nghiên cứu này cho thấy các bộ phận khác nhau của cây bèo tây, bao gồm rễ, thân và lá, có khả năng khác nhau trong việc tích lũy các PFC từ dung dịch nước. Trong đó, rễ là bộ phận có khả năng tích lũy các PFC nhiều nhất, tiếp đến là lá và cuối cùng là thân bèo. Nhìn chung, tổng hàm lượng PFC trong các bộ phận của cây bèo tăng lên theo thời gian tiếp xúc với các chất ô nhiễm. Cụ thể, mức độ tích lũy các PFC trong rễ tăng từ 333,4 ng/g trọng lượng khô trong tuần đầu tiên lên 597,7 ng/g trọng lượng khô ở tuần thứ ba. Trong khi đó, tổng hàm lượng PFC tích lũy trong thân cây bèo tây dao động từ 230,3 đến 334,3 ng/g trọng lượng khô và hàm lượng PFC trong lá thể hiện sự gia tăng ổn định, bắt đầu ở mức 241,9 ng/g trọng lượng khô vào tuần đầu tiên và đạt lần lượt 313,1 và 361,6 ng/g trọng lượng khô sau hai và ba tuần.

3.5.2. Thành phần của các PFC trong các bộ phận của cây bèo tây

Sự phân bố của các PFC trong các bộ phận khác nhau (rễ, thân và lá) của cây bèo tây ở các tuần khác nhau của thí nghiệm. Mặc dù được hấp thụ mạnh bởi rễ, PFOS lại là chất có hàm lượng thấp nhất trong thân và lá của cây bèo tây, lần lượt là 12,87 – 23,28 và 7,575 – 18,55 ng/g dw. Ngược lại, PFPeA là chất chiếm ưu thế trong hai bộ phận này, với hàm lượng được tìm thấy nằm trong khoảng 48,09 – 59,04 ng/g dw trong thân và 61,37 – 79,53 ng/g dw trong lá. Khác

với xu hướng quan sát được trong rễ, sự thay đổi về hàm lượng của các PFC trong thân và lá của cây bèo tây phức tạp hơn nhưng nhìn chung hàm lượng của các PFC mạch dài thấp hơn so với các chất mạch ngắn và các PFCA có hàm lượng cao hơn so với PFSA với cùng số cacbon. Hàm lượng của các PFC trong thân cây bèo tây giảm theo thứ tự PFPeA > PFBA > PFBS > PFHpA > PFOA > PFHxA > PFHxS > PFOS, và thứ tự giảm dần của chúng trong lá là PFPeA > PFBA > PFHxA > PFBS > PFHpA > PFOA > PFOS.

3.5.3. Sự tích lũy và vận chuyển của các PFC trong cây bèo tây

Các PFC với nhiều carbon trong phân tử có xu hướng được tích lũy chủ yếu ở rễ với $BCF_{r\sqrt{e}}$ thay đổi từ 3,63 L/kg đối với PFBA đến 17,88 L/kg đối với PFOS. BCF ở thân và lá của cây bèo tây tương đối nhỏ hơn so với rễ, nằm trong khoảng 2,33 - 5,90 L/kg và 1,85 - 7,95 L/kg tương ứng. Mặc dù PFOS có giá trị $BCF_{r\sqrt{e}}$ cao nhất, giá trị $BCF_{th\grave{a}n}$ và $BCF_{l\grave{a}}$ của hợp chất này lại là thấp nhất, chỉ bằng khoảng 1/8 và 1/10 so với ở rễ. Ngược lại, các BCF của PFPeA thể hiện giá trị thấp thứ hai ở rễ (3,87 L/kg) nhưng cao nhất ở thân và lá. Ngoài ra, dù có $BCF_{r\sqrt{e}}$ thấp nhất, PFBA lại xếp thứ hai về $BCF_{th\grave{a}n}$ và $BCF_{l\grave{a}}$ của cây bèo tây. Tương tự như kết quả thu được khi xem xét mối quan hệ đặc tính hóa lý PFC với hàm lượng ở các bộ phận khác nhau của cây bèo tây, $\log K_{oc}$ có tương quan dương với $BCF_{r\sqrt{e}}$ ($r = 0,967$, $p < 0,0005$) và tương quan âm với $BCF_{th\grave{a}n}$ và $BCF_{l\grave{a}}$ ($r = -0,883$, $p = 0,004$ và $r = -0,945$, $p < 0,0005$). Ngoài ra, chỉ tìm thấy mối tương quan dương mạnh giữa $\log K_{ow}$ và $BCF_{r\sqrt{e}}$ ($r = 0,839$, $p = 0,009$), trong khi mối tương quan giữa thông số này và $BCF_{th\grave{a}n}$ và $BCF_{l\grave{a}}$ là âm và không có ý nghĩa thống kê ($r = -0,556$, $p = 0,153$ và $r = -0,630$, $p =$

0,094). Mỗi tương quan tương tự cũng được tìm thấy giữa $\log D_{mw}$ và $\log D_{pw}$ với dữ liệu về $BCF_{r\bar{e}}$, $BCF_{th\bar{a}n}$ và $BCF_{l\bar{a}}$.

3.5.4. Cân bằng khối lượng và hiệu quả loại bỏ PFC

Trong tuần đầu tiên của thí nghiệm, một phần đáng kể các PFC vẫn tồn tại trong dung dịch nước, dao động từ 40,2% đối với PFPeA đến 69,1% đối với PFHxS và chiếm khoảng $59,7 \pm 8,2\%$ tổng số PFC. Tuy nhiên, khi thời gian tiếp xúc kéo dài, sự hấp thụ PFC đáng kể của cây bèo tây đã được ghi nhận. Tỷ lệ loại bỏ của từng PFC vào tuần thứ ba dao động từ 48,9% đến 82,6% và đạt $63,5 \pm 4,5\%$ tổng lượng PFC. Trong số các PFC, PFHxS thể hiện tỷ lệ loại bỏ thấp nhất (28,8 - 48,9%), trong khi PFPeA cho thấy hiệu quả cao nhất trong việc loại bỏ (59,8 - 82,6%).

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

1. Kết luận

1.1. Đánh giá được hiện trạng nồng độ và thành phần của các hợp chất PFC trong các mẫu nước mặt, nước ngầm, trầm tích và cá thu thập tại khu vực Phong Khê:

- Đối với nước mặt, các PFC với số C ≤ 8 cũng là những chất có tần suất phát hiện cao nhất nồng độ trong nước mặt cao nhất. Các hợp chất mạch dài được phát hiện khác, gồm các PFCA với C9-C14 chỉ được tìm thấy với nồng độ khá thấp. Xét theo vị trí lấy mẫu, nồng độ PFC được tìm thấy trong các mẫu nước ruộng thải cũng cao hơn so với nước sông Ngũ Huyện Khê và sông Cầu. Xét theo mùa, tổng PFC của các mẫu mùa khô cao hơn đáng kể so với tổng PFC tìm thấy

trong các mẫu mùa mưa. Kết quả phân tích rủi ro sinh thái cho thấy phần lớn các giá trị rủi ro đều nằm trong ngưỡng an toàn đối với các nhóm sinh vật thủy sinh. Hầu hết các mẫu nước mặt đều có nồng độ PFOS vượt ngưỡng tiêu chuẩn cho phép trong nước mặt của Liên minh châu Âu.

- Đối với nước ngầm, tần suất phát hiện các PFC thấp hơn so với trong nước mặt. Các PFCA với C6 - C8 là những hợp chất có mặt thường xuyên nhất trong các mẫu nước ngầm và tần suất phát hiện trong mùa khô cao hơn trong mùa mưa. Các mẫu phía Nam sông Ngũ Huyện Khê có tần suất phát hiện PFC cao hơn các mẫu phía Bắc sông ở cả hai mùa. Các giá trị rủi ro được tính toán cho tổng PFC trong nghiên cứu này đều nhỏ hơn 1,0 cho thấy chưa xuất hiện nguy cơ tiềm ẩn về rủi ro sức khỏe liên quan đến việc sử dụng nước ngầm trong khu vực nghiên cứu.
- Đối với trầm tích, các hợp chất PFCA mạch ngắn có tần suất và hàm lượng thấp trong khi các PFCA mạch dài được phát hiện ở tần suất và hàm lượng cao hơn. Sự khác biệt về tổng PFC của cặp vị trí sông Cầu – mương nước là đáng kể, trong khi cặp vị trí sông Cầu – sông Ngũ Huyện Khê ở ranh giới khác biệt và cặp vị trí sông Ngũ Huyện Khê – mương nước không có sự khác biệt có ý nghĩa thống kê. Hệ số phân bố giữa pha nước và trầm tích $\log K_d$ dao động từ 0,561 đến 3,974, phản ánh sự biến động lớn về phân bố pha giữa các hợp chất phụ thuộc vào nhiều yếu tố.
- Đối với cá, PFOS và PFUnDA là những PFC có tần suất phát hiện và nồng độ lớn nhất trong các mẫu cá. Hàm lượng trung bình của tổng PFC (ng/g w.w) tăng dần theo thứ tự: diếc

(0,743) < chép (0,882) < trê (1,267) < quả (1,292) < trôi (1,412) < rô phi (1,424) < thiếu (7,009). Tổng nồng độ PFC, PFCA và PFSA trong cá thiếu lớn hơn đáng kể so với các loài khác. Tính toán rủi ro cho thấy việc phơi nhiễm PFC không ảnh hưởng tiêu cực đến sức khỏe của người dân địa phương.

1.2. Luận án đã đánh giá được sơ bộ tiềm năng tích lũy các PFC của bèo tây từ dung dịch nước.

- Các bộ phận khác nhau của cây bèo tây, bao gồm rễ, thân và lá có khả năng khác nhau trong việc tích lũy các PFC từ dung dịch nước. Trong đó, rễ là bộ phận có khả năng tích lũy các PFC nhiều nhất, tiếp đến là lá và cuối cùng là thân bèo. Các PFC mạch dài có khả năng tích lũy sinh học cao hơn trong rễ cây bèo tây so với các hợp chất mạch ngắn.
- Kiểm định tương quan Pearson chỉ ra mối quan hệ dương mạnh giữa nồng độ PFC trong rễ bèo tây sau ba tuần với logK_{oc} và logK_{ow}, mối tương quan âm đáng kể giữa logK_{oc} và tổng nồng độ PFC ở cả thân và lá.
- Tỷ lệ loại bỏ của từng PFC vào tuần thứ ba dao động từ 48,9% đến 82,6% và đạt $63,5 \pm 4,5\%$ tổng lượng PFC. Trong số các PFC, PFHxS thể hiện tỷ lệ loại bỏ thấp nhất (28,8 - 48,9%), trong khi PFPeA cho thấy hiệu quả cao nhất trong việc loại bỏ (59,8 - 82,6%). Hiệu quả loại bỏ PFC mạch ngắn như PFBA, PFPeA và PFBS được phát hiện vượt trội hơn so với các đồng đẳng mạch dài hơn.

2. Kiến nghị

- Tiếp tục triển khai hướng nghiên cứu sử dụng bèo tây để xử lý ô nhiễm các hợp chất PFC trong nước ở các nồng độ khác nhau.
- Nghiên cứu tiềm năng loại bỏ các hợp chất PFC của một số loại thực vật khác tại Việt Nam

DANH MỤC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC CỦA TÁC GIẢ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

1. **Phung Thi Vi**, Nguyen Thuy Ngoc, Phan Dinh Quang, Nguyen Thanh Dam, Nguyen Minh Tue, Le Huu Tuyen, Pham Hung Viet, Duong Hong Anh (2022), “Perfluoroalkyl substances in freshwater and marine fish from northern Vietnam: Accumulation levels, profiles, and implications for human consumption”, *Marine Pollution Bulletin* Vol. 182, 113995. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113995>. **Tạp chí WoS/Q1, IF = 4.9.**
2. **Phung Thi Vi**, Truong Thi Kim, Le Thanh Huyen, Pham Hung Viet, Duong Hong Anh (2023), “Determination of perfluorinated compounds in *Eichhornia crassipes*(Mart.) Solms using LC-MS/MS in combination with sample preparation by ultrasound-assisted extraction and solid-phase extraction”, *Journal of Science and Technology - Nguyen Tat Thanh University* Vol. 6, No. 4, pp. 8-14. <https://doi.org/10.55401/rd9y5295>.
3. **Phung Thi Vi**, Nguyen Thuy Ngoc, Nguyen Thanh Dam, Pham Hung Viet, Duong Hong Anh (2024), “Levels, profiles and distribution of perfluoroalkyl substances in groundwater in Bac Ninh province, Vietnam”, *Vietnam Journal of Science and Technology*, Vol. 63, No. 1, pp. 123-137. <https://doi.org/10.15625/2525-2518/19196>. **Tạp chí Scopus.**
4. **Thi Vi Phung**, Thanh Dam Nguyen, Thuy Ngoc Nguyen, Thi Kim Truong, Hung Viet Pham, Hong Anh Duong (2024), “Removal of perfluoroalkyl acids (PFAAs) from aqueous solution by water hyacinth (*Eichhornia crassipes*): Uptake, accumulation, and translocation”, *Science of the Total Environment* Vol. 926, 172029. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172029>. **Tạp chí WoS/Q1, IF = 8.0.**