

HÀM LƯỢNG CÁC HỢP CHẤT TƯƠNG TỰ DIOXIN TRONG CÁC MẪU THỊT LỢN HUN KHÓI

Đến tòa soạn 08-10-2024

Nguyễn Thu Uyên^{1,2}, Đỗ Hoàng Giang¹, Hoàng Thùy Dương¹, Lưu Hải Nhi¹, Bùi Thị Nhật Lệ¹,
Nguyễn Thị Thu Minh¹, Nguyễn Thị Hồng Anh¹, Nguyễn Thị Luyến¹, Vũ Đức Nam¹, Nguyễn Tiến Đạt^{1,2,*}

¹Trung tâm Nghiên cứu và Phát triển Công nghệ cao, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam (VAST), 18-Hoàng Quốc Việt, Cầu Giấy, Hà Nội.

²Học viện Khoa học và Công nghệ, VAST, 18-Hoàng Quốc Việt, Cầu Giấy, Hà Nội.

*E-mail: ntddat@chtd.vast.vn

SUMMARY

LEVELS OF DIOXIN-RELATED COMPOUNDS IN SMOKED PORK SAMPLES

Smoked pork samples were divided into 4 groups depending on the characteristics of sample matrices (fatty meat and lean meat) and combustion material (straw and mixture of straw and polyethylene). By using the GC-MS method and isotope dilution technique, content of each dioxin related compound (DRC) in smoked pork was quantified and utilized as a crucial dataset for further data analysis by po. As a result, DRC content on fatty meat was significantly higher than on lean meat with the same smoked condition. In addition, the presence of polyethylene in combustion material was determined as culprit of several DRC formations, like PCB 169, 234678-HxCDF and 1234678-HpCDF.

Keywords: dioxin related compounds, smoked pork, characteristic of sample matrices, multivariate statistical data analysis, chemical characteristics.

1. MỞ ĐẦU

Rom là một trong những phụ phẩm nông nghiệp trong quá trình sản xuất gạo và được sử dụng cho nhiều mục đích khác nhau như trồng nấm, ủ phân, sản xuất khí sinh học...[1] Ngoài ra, loại phụ phẩm nông nghiệp này được tận dụng làm nguyên liệu trong phương pháp hun khói truyền thống ở các vùng nông thôn Việt Nam. Việc này không chỉ giúp tiết kiệm chi phí và còn tận dụng được nguồn nguyên liệu ngay tại địa phương. Bên cạnh việc sản sinh một số loại hợp chất như phenol, aldehyde, ketone, al;cohol, ester, các acid hữu cơ và các hợp chất dị vòng [2] có khả năng ngăn cản sự phát

triển của vi sinh vật từ đó làm tăng thời gian bảo quản thực phẩm, việc đốt rom còn là nguyên cơ sản sinh một số hợp chất tương tự dioxin. Đây là các hợp chất có độc tính cao và có thể nhiễm vào thực phẩm trong quá trình chế biến [3]. DRC được chia thành 3 nhóm khác nhau dựa vào đặc điểm cấu trúc của chúng, bao gồm: polychlorinated dibenzo-*p*-dioxin (PCDD), polychlorinated dibenzofuran (PCDF) và polychlorinated biphenyl (PCB) [4] và thường sinh ra từ các quá trình đốt cháy không hoàn toàn sinh khối với sự có mặt của chlorine [5]. Trong các công bố trước đây của các nhà khoa học trên thế giới đều phát hiện sự có mặt của các hợp chất DRC trong tro và khói sinh

ra do quá trình đốt cháy rơm [6-8]. Tuy nhiên, hiện nay chưa có nghiên cứu nào về sự ảnh hưởng của loại nguyên liệu đốt này đến thành phần DRC phát hiện trong các mẫu thực phẩm được chế biến bằng phương pháp hun khói.

Vì vậy, trong nghiên cứu này, phương pháp sắc kí khí ghép nối đầu dò khối phổ (GC-MS) kết hợp với kĩ thuật pha loãng đồng vị được sử dụng để phát hiện và xác định hàm lượng một số DRC trong các mẫu thịt lợn hun khói với đặc điểm khác nhau về nền mẫu và được hun khói bởi các nguyên liệu khác nhau. Sau đó, kĩ thuật phân tích thành phần chính được sử dụng để xác định sự ảnh hưởng của nguyên liệu hun khói trên mỗi loại thịt đến hàm lượng các DRC phơi nhiễm trong quá trình chế biến thực phẩm.

2. THỰC NGHIỆM

2.1. Thu thập và bảo quản mẫu

Các mẫu thịt lợn được thu thập trên thị trường và chia thành 2 nhóm dựa trên loại thịt hun khói (thịt nạc và thịt mỡ). Sau đó, các mẫu này được hun khói bằng rơm hoặc rơm trộn với polyethylene hay PE trong 7 ngày liên tục (18 tiếng/ngày).

Các mẫu sau khi rửa sạch được tiến hành đông khô để loại bỏ hoàn toàn lượng nước trong mẫu trước khi bảo quản ở -18°C trong tủ đông.

2.2. Hóa chất và thiết bị

2.2.1. Hóa chất và chất chuẩn

Chất chuẩn PCB bao gồm: hỗn hợp các PCB (WHO/NIST/NOAA). Dung dịch hỗn hợp các chất chuẩn PCB được pha với nồng độ $10\text{ }\mu\text{g/mL}$ trong *n*-hexane: Accustandard (USA). Hỗn hợp các đồng vị đánh dấu: hỗn hợp đồng vị $^{13}\text{C}_{12}$ đánh dấu của PCB (bao gồm PCB-28, -52, -101, -138, -153, -180, -209) với nồng độ $5\mu\text{g/mL}$ trong *n*-hexane được cung cấp bởi CIL, IEM., (USA), hỗn hợp đồng vị

$^{13}\text{C}_{12}$ đánh dấu (bao gồm PCB-77, -81, -123, -126, -169) với nồng độ $1\text{ }\mu\text{g/mL}$ được pha trong *n*-hexane: LGC (Germany, P/N: EC-4938).

Hỗn hợp 17 chất chuẩn PCDD/F được sản xuất theo phương pháp 1613B [9] và phương pháp 23 [10] của US EPA do CIL (USA) cung cấp, gồm dung dịch chuẩn, đồng vị đánh dấu ^{13}C , dung dịch nội chuẩn (P/N: EDF-9999 và EDF-4052).

Chất nội chuẩn được thêm vào dung dịch và dung dịch gốc của các đồng vị đánh dấu được chuẩn bị theo phương pháp US EPA 1613B [9] và phương pháp US EPA 23 [10] được sử dụng để xác định độ thu hồi của phương pháp (P/N CIL EDF-5999, EDF-8999, EDF-4053 và EDF-4055).

Khí N_2 và khí He với độ tinh khiết 99,99%. Chất chuẩn hiệu chỉnh thiết bị: Perfluorotributylamine: Thermo Scientific (USA). Silica gel 60-200 mesh: VWR International (USA). Than hoạt tính tẩm trên silica gel: Wako (Japan). Dung môi được sử dụng để phân tích PCB và PCDD/F gồm dichloromethane, acetone, toluene, nonane, *n*-hexane và methanol và các loại hóa chất khác Na_2SO_4 , silica gel và H_2SO_4 98%: Merck (Singapore).

Các chất hấp phụ để làm sạch mẫu và cột hấp phụ đa lớp silicagel dùng cho phân tích PCDD/F được chuẩn bị theo quy trình được đề cập trong nghiên cứu trước đây của chúng tôi [11].

2.2.2. Thiết bị

Hệ thống sắc kí khí (GC Trace 1310, Thermo Scientific, USA) bao gồm: hệ thống bơm mẫu tự động TriPlus RSH, đầu dò khối phổ EI-MS/MS Model TSQ 9000 đầu dò khối phổ phân giải cao HRMS: Magnetic Sector/Double-Focusing System, cột mao quản Thermo DB-5MS ($30\text{m} \times 0,25\text{mm} \times 0,25\mu\text{m}$, 5% methylphenyl polysiloxane), cột mao quản TG-Dioxin

(60m×0,25mmI.D.×0,25µm).

2.3. Phương pháp

2.3.1. Chiết mẫu

Các mẫu thịt lợn được chiết trên thiết bị chiết nhanh E-916 (Büchi). Sau khi đông khô và nghiền nhỏ, 5 g mẫu mỗi loại được thêm 25 µL dung dịch chuẩn đồng vị đánh dấu của PCB (10 pg/µL) hoặc 50 µL chuẩn đồng vị đánh dấu của PCDD/F (2 pg/µL) trước khi chiết. Sau đó các mẫu này được chiết trên thiết bị chiết nhanh E-916 cùng với hỗn hợp dung môi bao gồm toluene và acetone (7:3, v/v) ở nhiệt độ 120° C và áp suất 100 bar. Các mẫu được chiết với 3 chu kỳ với thời gian gia nhiệt tương ứng 4/1/1 phút, ngâm chiết trong 5 phút rồi tiến hành xả rửa với dung môi và khí.

2.3.2. Xử lý mẫu

- *Xác định hàm lượng chất béo:* Hàm lượng chất béo tổng số của các mẫu thịt lợn hun khói được xác định bằng phương pháp trọng lượng. Sau khi loại bỏ hoàn toàn dung môi, dịch chiết tiếp tục được sấy khô ở 80°C trong vòng 5 giờ để tính hàm lượng chất béo trong các mẫu phân tích.

- *Làm giàu và làm sạch mẫu:* Dịch chiết được xử lý với H₂SO₄ (98%) để loại bỏ chất béo. Sau đó, lượng acid còn lại trong phần chất lỏng hữu cơ được loại bỏ bằng cách chiết phân lớp với nước nhiều lần. Phần chất lỏng hữu cơ được làm sạch trên cột silica gel đa lớp ghép nối với cột than hoạt tính đã chuẩn bị trước. Các DRC được rửa giải ra khỏi cột làm sạch bằng dung môi thích hợp. Sau đó, dịch chiết được cô cạn bằng khí N₂. 50µL dung dịch nội chuẩn đồng vị ¹³C của PCB (500ng/mL) hoặc 50µL dung dịch nội chuẩn đồng vị ¹³C PCDD/F (2pg/µL) được thêm vào mẫu phân tích rồi hoàn nguyên lần lượt với 0,5 mL *n*-hexane hoặc 10 µL nonane trước khi phân tích trên GC-MS.

2.3.3. Phân tích trên hệ thống GC-MS

Quá trình phân tích hàm lượng PCB và PCDD/F được tiến hành trên hệ thống Model 1310 Trace GC (Thermo Scientific, USA) được ghép nối với đầu dò khối phổ, cột sắc kí phù hợp với đối tượng phân tích. Chương trình được điều khiển bằng phần mềm X-Calibur. Chương trình phân tích trên GC-MS cài đặt dựa trên các nghiên cứu đã được công bố trước đây của chúng tôi [11, 12].

2.3.4. Xử lý số liệu

Dữ liệu sẽ được xử lý trên phần mềm Microsoft Excel 2016 (Microsoft Corporation, USA). Quá trình chuẩn hóa và kỹ thuật thành phần chính – PCA) được tiến hành bằng ngôn ngữ R (R Foundation for Statistical Computing, Áo)

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Hàm lượng DRC

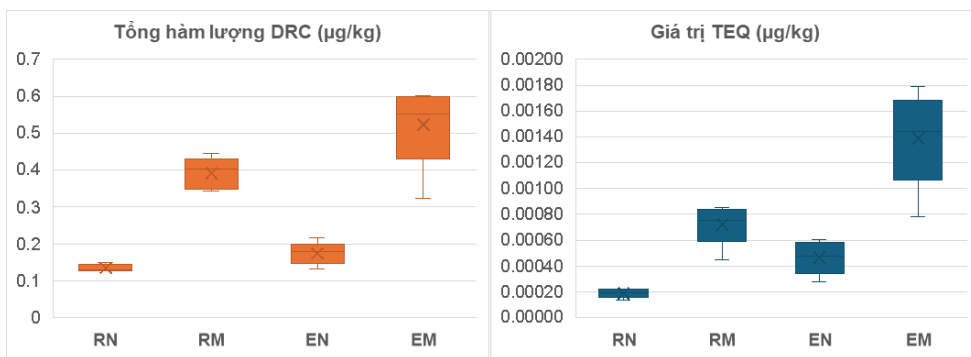
Tín hiệu của 17 PCDD/F và 11 PCB được thu thập và sử dụng làm cơ sở để xác định hàm lượng trong các mẫu thịt lợn hun khói. Trong số 17 hợp chất PCDD/F khảo sát, chỉ có 234678-HxCDF và 1234678-HpCDF được phát hiện và hàm lượng của 15 PCDD/F còn lại đều nhỏ hơn MDL nên bảng số liệu này chỉ thể hiện hàm lượng của 11 PCB và 2 hợp chất PCDF trên.

Khoảng giá trị tổng hàm lượng DRC và TEQ của các nhóm mẫu được biểu diễn ở *Hình 1* cho thấy tổng hàm lượng DRC được phát hiện trong các mẫu thịt mỡ (nhóm RM và EM) cao hơn đáng kể so với hai nhóm mẫu còn lại: tổng hàm lượng DRC trong các mẫu thuộc nhóm RN và EN dao động trong khoảng 0,1 đến 0,2µg/kg mẫu thô, giá trị này của các mẫu thịt mỡ như RM và EM đều trên 0,3µg/kg mẫu thô.

Hệ số độc tương đương hay TEF thể hiện tương quan độc tính của PCDD, PCDF và PCB so với dạng PCDD độc hại nhất là

2378-TCDD. Trong nghiên cứu này, giá trị TEF được sử dụng của các PCDD, PCDF và dl-PCB (PCB tương tự dioxin) đã được WHO đánh giá lại vào tháng 10 năm 2022 [13]. Do độc tính của hỗn hợp các DRC có thể được biểu thị bằng độ độc tương đương hay TEQ, biểu đồ hộp về TEQ có sự tương đồng rất lớn với biểu đồ hộp biểu diễn tổng hàm lượng DRC của các mẫu thuộc các nhóm khác nhau. Sự khác biệt giữa 2 biểu đồ này nằm ở vị trí của hai nhóm mẫu RM và EN. Trong khi tổng hàm lượng DRC của các mẫu RM

cao hơn hẳn so với các mẫu EN, đối với khoảng giá trị TEQ, sự khác biệt này được thu hẹp lại đáng kể (0,0004 đến 0,0008 $\mu\text{g/kg}$ đối với nhóm RM và 0,0002 đến 0,0006 $\mu\text{g/kg}$ đối với nhóm EN). Lí do cho hiện tượng này chính là độ độc của các DRC sinh ra khi có mặt PE trong quá trình hun khói ở mẫu EN có xu hướng cao hơn các DRC còn lại. Điều này được thể hiện ở lượng lớn của một số DRC có độ tính cao như PCB-126, -114, -169, 234678-HxCDF và 1234678-HpCDF được phát hiện trong các mẫu EM.



Hình 1: Biểu đồ hộp về hàm lượng DRC và giá trị TEQ của các nhóm mẫu phân tích

Từ số liệu ở PHỤ LỤC

Bảng S1 có thể thấy rằng, hầu hết các PCB được phát hiện trong hầu hết các mẫu phân tích, ngoài trừ hợp chất PCB 169 chỉ được phát hiện trong các mẫu thịt lợn hun khói bằng rơm có lẫn PE. Trong khi đó, không hợp chất nào thuộc nhóm PCDD và PCDF được phát hiện trong các mẫu được hun khói bằng rơm, đồng thời chỉ hai hợp chất 234678-HxCDF và 1234678-HpCDF phát hiện trong các mẫu EN và EM. Có thể thấy rằng, sự khác biệt trong thành phần nguyên liệu đốt và đặc điểm của mẫu có thể dẫn đến sự khác biệt về sự có mặt của các DRC trong mẫu phân tích.

3.2.1. Phân tích số liệu bằng kỹ thuật phân tích thành phần chính

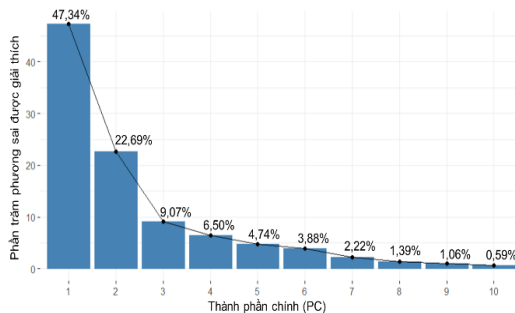
Phương pháp phân tích thành phần chính (PCA) được sử dụng nhằm biểu diễn dữ liệu theo một hệ cơ sở mới, sao cho cho

phần lớn thông tin của dữ liệu tập trung ở một vài chiều [14]. Sau đó, kết quả được biểu diễn dưới 3 dạng: biểu đồ biểu đồ sụt giảm phương sai, biểu đồ phân tán, biểu đồ tải. Một dạng biểu đồ khác cũng thường được sử dụng chính là biểu đồ kép. Biểu đồ kép là sự kết hợp của biểu đồ phân tán và biểu đồ tải trên cùng một hệ tọa độ. Vì vậy, biểu đồ kép cung cấp thông tin về sự phân bố của các mẫu trên mặt phẳng tạo bởi các PC được chọn và chỉ ra thành phần hóa học đặc trưng của từng nhóm.

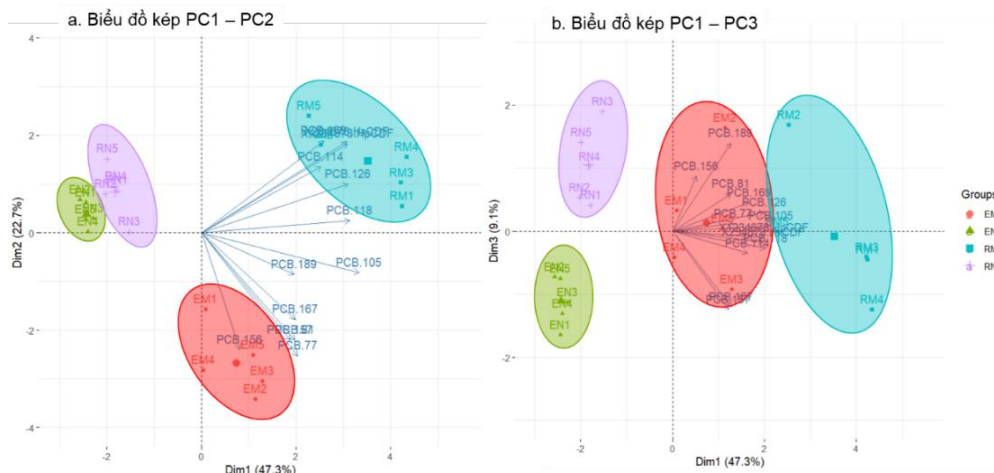
Biểu đồ sụt giảm phương sai cho thấy tỉ lệ phương sai mà mỗi PC được giải thích giảm dần theo thứ tự từ PC đầu tiên đến PC cuối cùng. Hình 2 cho thấy khoảng 50% phương sai được giải thích ở PC1, theo sau là PC2 và PC3 với tỉ lệ phương sai được biểu diễn giảm nhanh chóng xuống 22% và 9%. Vì tổng phần trăm phương sai được giải thích trên 3 PC đầu

đạt gần 80%, ba PC được dùng này để phân tích dữ liệu.

Trên biểu đồ kép PC1-PC2 ở Hình 3, các mẫu RN, RM, EN và EM nằm ở những vùng riêng biệt với nhau trên biểu đồ với những đặc trưng về thành phần hóa học khác nhau. Các mẫu thuộc nhóm EM và RM nằm tách biệt hoàn toàn với nhau và thuộc hai góc phần tư khác nhau. Ở biểu đồ kép PC1 và PC2, nhóm EN và RN đã có sự phân biệt nhất định. Mặc dù vậy dù sự khác biệt không đáng kể khi các nhóm này nằm cạnh nhau và cùng thuộc góc phần tư IV trên biểu đồ kép PC1 và PC2.



Hình 2: Biểu đồ sụt giảm phương sai



Hình 3: Biểu đồ kép của các mẫu phân tích

Khác với biểu đồ kép PC1-PC2, trong biểu đồ kép PC1-PC3 ở Hình 3, sự phân biệt giữa hai nhóm mẫu RN và EN rõ ràng hơn. Các mẫu thuộc hai nhóm này nằm ở chiều âm của PC1 và thuộc hai góc phần tư khác nhau. Nhóm EN nằm ở hướng ngược lại với vector PCB-157 và

Hơn nữa, các mẫu EM nằm ở góc phần tư I, cùng phía với vector PCB-126, -114, -169, 234678-HxCDF và 1234678n-HpCDF. Kết hợp với dữ liệu về hàm lượng các hợp chất này trong các mẫu EM cao hơn hẳn so với các nhóm mẫu còn lại. Do đó, 5 hợp chất này được coi là chỉ thị dương cho nhóm mẫu EM. Trong khi các mẫu thuộc nhóm RM nằm cùng hướng với vector PCB-156 và ở góc phần tư II. Hơn nữa, hàm lượng PCB-156 trong các mẫu RM dao động trong khoảng 0,025 đến 0,048 $\mu\text{g/kg}$ mẫu thô, trong khi đa số các mẫu còn lại đều có hàm lượng DRC này đều nhỏ hơn 0,024 $\mu\text{g/kg}$ mẫu thô. Vì vậy, PCB-156 được đại diện cho nhóm RM. Các mẫu EN và RN cùng nằm ở chiều âm của PC1, ngược hướng với các vector DRC đã gợi ý về mối liên hệ giữa hàm lượng chất béo và hàm lượng DRC được phát hiện trong các mẫu phân tích: hàm lượng DRC trong các mẫu thịt mỡ có xu hướng cao hơn so với các mẫu thịt nạc. Dự đoán này được chứng minh bằng ở Hình 1 và Phụ lục Bảng S1.

PCB-167, trong khi PCB-81, -169 ngược hướng với khu vực phân bố của nhóm RN. Dữ liệu về hàm lượng các chất này trong PHỤ LỤC

Bảng S1 cho thấy hàm lượng PCB-157, -167 trong mẫu EN và hàm lượng PCB-81, -169 trong các mẫu RN thấp hơn đáng kể

so với các nhóm mẫu còn lại. Do đó, các hợp chất này được xác định chỉ thị âm cho các nhóm mẫu EN và RN.

3.2. Thảo luận

Kết quả thực nghiệm kết hợp với các công bố trước đây về DRC có thể khẳng định được rằng một lượng DRC sinh ra trong quá trình đốt cháy các loại nguyên liệu như gỗ, mùn cưa hay rơm rạ [5, 15]. Tuy vậy, trong nghiên cứu của chúng tôi, hầu hết các hợp chất dioxin và dioxin không được phát hiện trong các mẫu thịt lợn được hun khói bằng rơm trong điều kiện thử nghiệm. Ngoài ra, sự khác biệt trong đặc điểm của mẫu phân tích và trong thành phần hóa học của nguyên liệu đốt gây ra sự khác biệt đáng kể trong hàm lượng DRC trong các mẫu phân tích. Các mẫu thịt mỡ có tổng hàm lượng DRC lớn hơn hẳn so với các mẫu thịt nạc. Nguyên nhân của hiện tượng này chính là cấu trúc hóa học của các DRC. Theo Công ước Stockholm, DRC có độ phân cực kém nên dễ dàng tích lũy ở mô mỡ của động vật [16]. Do đó, hàm lượng chất béo càng cao, hàm lượng DRC được phát hiện càng lớn. Hơn nữa, sự có mặt của polyethylene trong nguyên liệu đốt được cho là nguyên nhân sinh ra một số hợp chất như PCB 169, 234678-HxCDF và 1234678-HpCDF. Kết quả nghiên cứu của chúng tôi đã chỉ ra rằng các hợp chất này chỉ xuất hiện của các mẫu EN và EM được hun khói bằng rơm và PE. Kết quả này phù hợp với các công bố trước đây về sự ảnh hưởng của loại polymer này đến sự hình thành và hàm lượng của các DRC [17, 18].

4. KẾT LUẬN

Hàm lượng của 11 PCB và 17 PCDD/F được xác định trong các mẫu thịt lợn được hun khói bằng các nguyên liệu đốt khác nhau (rơm và hỗn hợp của rơm và polyethylene). Kết quả nghiên cứu đã chỉ ra rằng, hàm lượng DRC được phát hiện

trong các mẫu thịt mỡ cao hơn đáng kể so với các mẫu thịt nạc được hun khói trong cùng một điều kiện. Ngoài ra, sự có mặt của PE trong nguyên liệu đốt được coi là nguyên nhân sinh ra một số DRC có độc tính cao hơn so với các hợp chất còn lại. Kết hợp với các kỹ thuật thông kê đa biến, thành phần hóa học đặc trưng của từng nhóm mẫu đã được xác định, trong đó các mẫu thịt nạc (RN và EN) chỉ có thể xác định được chỉ thị âm trong khi hầu hết DRC là chỉ thị riêng cho các mẫu RM và EM.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được thực hiện trong khuôn khổ của đề tài TĐDIOX.03/22-24 của Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Nam T. S., et al., (2014), Ước tính lượng và các biện pháp xử lý rơm rạ ở một số tỉnh đồng bằng sông Cửu Long, *Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ*, **(32)**, pp. 87-93.
2. Tóth L., Potthast K., (1984), *Chemical Aspects of the Smoking of Meat and Meat Products, Advances in Food Research*, Chichester C. O., et al., pp. 87-158, Academic Press.
3. Jones K. C., De Voogt P., (1999), Persistent organic pollutants (POPs): state of the science, *Environmental Pollution*, **100(1)**, pp. 209-221.
4. Safe S., (1990), Polychlorinated Biphenyls (PCBs), dibenzo-p-dioxins (PCDDs), dibenzofurans (PCDFs), and Related Compounds: Environmental and Mechanistic Considerations Which Support the Development of Toxic Equivalency Factors (TEFs), *Critical Reviews in Toxicology*, **21(1)**, pp. 51-88.
5. Breivik K., et al., (2004), Primary sources of selected POPs: regional and global scale emission inventories, *Environmental Pollution*, **128(1)**, pp. 3-16.
6. Kao J.-H., et al., (2007), Effects of Burnings of Wax Apple Stubble and Rice Straw on Polychlorinated dibenzo-p-dioxin and dibenzofuran Concentrations in Air and Soil, *Journal of the Air & Waste Management Association*, **57(4)**, pp. 457-464.
7. Khalid A., et al., 2023, "Estimation Inventories

- of Persistent Organic Pollutants from Rice Straw Combustion as an Agricultural Waste," *Fire*, Ed.
8. Minomo K., et al., (2011), Polychlorinated dibenzo-p-dioxins, dibenzofurans, and dioxin-like polychlorinated biphenyls in rice straw smoke and their origins in Japan, *Chemosphere*, **84(7)**, pp. 950-956.
 9. Telliard W., 1994, "Method 1613: Tetra-through octa-chlorinated dioxins and furans by isotope dilution HRGC/HRMS," Ed., US Environmental Protection Agency Office of Water, Washington, DC.
 10. United States Environmental Protection Agency (USEPA), (1991), Determination of polychlorinated dibenzop-dioxins and polychlorinated dibenzofurans from municipal waste combustors. Method 23, USA,
 11. Nguyen Thi X., et al., (2023), Analysis of PCDD/Fs in environmental samples by using gas chromatography in combination with high resolution mass spectrometry: optimization of sample preparation, *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, pp. 1-17.
 12. Phạm Thị Diễm Quỳnh, et al., (2023), Determination of polychlorinated biphenyls in marine fish samples by gas chromatography tandem mass spectrometry (GC-MS), *Vietnam Journal of Food Control*, **6(2)**, pp. 126-142.
 13. Devito M., et al., (2024), The 2022 world health organization reevaluation of human and mammalian toxic equivalency factors for polychlorinated dioxins, dibenzofurans and biphenyls, *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, **146(1)**, pp. 105525.
 14. Forkman J., et al., (2019), Hypothesis Tests for Principal Component Analysis When Variables are Standardized, *Journal of Agricultural, Biological and Environmental Statistics*, **24(2)**, pp. 289-308.
 15. Vaccher V., et al., (2020), Levels of persistent organic pollutants (POPs) in foods from the first regional Sub-Saharan Africa Total Diet Study, *Environment International*, **135**, pp. 105413.
 16. Lallas P., (2001), The Stockholm Convention on persistent organic pollutants, *American Journal of International Law*, **95(3)**, pp. 692-708.
 17. Piao M., et al., (1999), Characterization of the combustion products of polyethylene, *Chemosphere*, **39(9)**, pp. 1497-1512.
 18. Tomsej T., et al., (2018), The impact of co-combustion of polyethylene plastics and wood in a small residential boiler on emissions of gaseous pollutants, particulate matter, PAHs and 1,3,5- triphenylbenzene, *Chemosphere*, **196(1)**, pp. 18-24.

PHỤ LỤC

Bảng S1: Hàm lượng DRC trong các mẫu phân tích

TT	Tên mẫu	Nhóm	PCB 77 (µg/kg)	PCB 81 (µg/kg)	PCB 118 (µg/kg)	PCB 114 (µg/kg)	PCB 105 (µg/kg)	PCB 126 (µg/kg)	PCB 156 (µg/kg)	PCB 167 (µg/kg)	PCB 157 (µg/kg)	PCB 169 (µg/kg)	PCB 189 (µg/kg)	234678-HxCDF (pg/g)	1234678-HpCDF (pg/g)
1	RN1	RN ⁽¹⁾	0,014 ± 0,0015	0,008 ± 0,0010	0,004 ± 0,0057	0,048 ± 0,0053	0,002 ± 0,0059	0,002 ± 0,0009	0,015 ± 0,0035	0,002 ± 0,0052	0,024 ± 0,0017	0	0	0	0
2	RN2		0,02 ± 0,0024	0,010 ± 0,0017	0,006 ± 0,0066	0,039 ± 0,0027	0,002 ± 0,0074	0,002 ± 0,0032	0,018 ± 0,0017	0,013 ± 0,0019	0,015 ± 0,0022	0	0	0	0
3	RN3		0,024 ± 0,0201	0,007 ± 0,0006	0,006 ± 0,0098	0,043 ± 0,0027	0,003 ± 0,0035	0,002 ± 0,0053	0,020 ± 0,0098	0,020 ± 0,0022	0,020 ± 0,0014	0	0	0	0
4	RN4		0,020 ± 0,0019	0,012 ± 0,0014	0,005 ± 0,0042	0,018 ± 0,0016	0,003 ± 0,0033	0,001 ± 0,0013	0,020 ± 0,0055	0,020 ± 0,0003	0,025 ± 0,0012	0	0	0	0
5	RN5		0,019 ± 0,0006	0,004 ± 0,0029	0,005 ± 0,0014	0,028 ± 0,0022	0,002 ± 0,0067	0,001 ± 0,0027	0,024 ± 0,0017	0,022 ± 0,0011	0,015 ± 0,0035	0	0	0	0
6	RM1	RM ⁽²⁾	0,040 ± 0,004	0,029 ± 0,0049	0,072 ± 0,0014	0,052 ± 0,0031	0,037 ± 0,0012	0,009 ± 0,0021	0,034 ± 0,0049	0,014 ± 0,0015	0,038 ± 0,0016	0	0	0	0
7	RM2		0,073 ± 0,003	0,034 ± 0,0098	0,038 ± 0,0057	0,053 ± 0,0032	0,064 ± 0,0021	0,006 ± 0,0018	0,048 ± 0,0017	0,029 ± 0,0016	0,026 ± 0,0035	0	0	0	0
8	RM3		0,082 ± 0,0056	0,027 ± 0,0025	0,083 ± 0,0017	0,06 ± 0,0089	0,058 ± 0,0032	0,008 ± 0,0057	0,031 ± 0,0043	0,030 ± 0,0021	0,050 ± 0,0034	0	0	0	0
9	RM4		0,056 ± 0,0059	0,037 ± 0,0037	0,062 ± 0,0026	0,039 ± 0,0039	0,043 ± 0,0082	0,001 ± 0,0097	0,041 ± 0,0014	0,025 ± 0,0082	0,039 ± 0,0032	0	0	0	0
10	RM5		0,059 ± 0,0089	0,045 ± 0,0088	0,094 ± 0,0019	0,041 ± 0,0035	0,058 ± 0,0056	0,008 ± 0,0039	0,024 ± 0,0058	0,030 ± 0,0036	0,032 ± 0,0006	0	0	0	0
11	EN1	EN ⁽³⁾	0,030 ± 0,0011	0,014 ± 0,0049	0,008 ± 0,0011	0,062 ± 0,0036	0,001 ± 0,0039	0,005 ± 0,0053	0,024 ± 0,0053	0,013 ± 0,0012	0,004 ± 0,0017	0,010 ± 0,0006	0,008 ± 0,0005	0,018 ± 0,0005	0,010 ± 0,0005
12	EN2		0,042 ± 0,085	0,018 ± 0,0008	0,007 ± 0,0040	0,018 ± 0,0030	0,003 ± 0,0011	0,007 ± 0,0009	0,007 ± 0,0041	0,004 ± 0,0040	0,009 ± 0,0015	0,003 ± 0,0007	0,013 ± 0,0009	0,016 ± 0,0002	0,013 ± 0,0001

TT	Tên mẫu	Nhóm	PCB 77	PCB 81	PCB 118	PCB 114	PCB 105	PCB 126	PCB 156	PCB 167	PCB 157	PCB 169	PCB 189	234678-HxCDF	1234678-HpCDF
13	EN3		0,032 ± 0,0028	0,019 ± 0,0067	0,003 ± 0,0088	0,08 ± 0,0098	0,003 ± 0,0046	0,003 ± 0,0068	0,043 ± 0,0024	0,007 ± 0,0005	0,002 ± 0,0032	0,008 ± 0,0002	0,016 ± 0,0008	0,014 ± 0,0002	0,004 ± 0,0006
14	EN4		0,028 ± 0,0014	0,01 ± 0,0077	0,005 ± 0,0025	0,073 ± 0,0045	0,002 ± 0,0048	0,002 ± 0,0079	0,014 ± 0,0044	0,006 ± 0,0005	0,011 ± 0,0018	0,006 ± 0,0006	0,024 ± 0,0006	0,005 ± 0,0003	0,009 ± 0,0002
15	EN5		0,009 ± 0,0008	0,004 ± 0,0001	0,005 ± 0,0005	0,008 ± 0,0079	0,002 ± 0,0349	0,010 ± 0,0012	0,024 ± 0,0028	0,002 ± 0,0017	0,005 ± 0,002	0,002 ± 0,0001	0,021 ± 0,0015	0,012 ± 0,0049	0,004 ± 0,0035
16	EM1	EM ⁽⁴⁾	0,032 ± 0,0005	0,039 ± 0,0008	0,089 ± 0,0065	0,156 ± 0,0092	0,057 ± 0,0029	0,024 ± 0,0026	0,034 ± 0,0045	0,003 ± 0,0026	0,042 ± 0,0019	0,020 ± 0,0011	0,014 ± 0,0044	1,127 ± 0,0037	1,682 ± 0,0110
17	EM2		0,030 ± 0,0007	0,035 ± 0,0005	0,074 ± 0,0002	0,012 ± 0,0089	0,062 ± 0,0409	0,002 ± 0,0024	0,024 ± 0,0033	0,013 ± 0,0019	0,008 ± 0,0028	0,025 ± 0,0037	0,017 ± 0,0030	1,148 ± 0,0031	1,661 ± 0,0145
18	EM3		0,059 ± 0,0003	0,015 ± 0,0007	0,174 ± 0,0035	0,140 ± 0,0036	0,058 ± 0,0057	0,018 ± 0,0034	0,024 ± 0,0004	0,030 ± 0,0029	0,032 ± 0,0019	0,025 ± 0,0037	0,021 ± 0,0015	1,028 ± 0,0385	1,46 ± 0,0187
19	EM4		0,048 ± 0,0007	0,014 ± 0,0013	0,111 ± 0,0042	0,220 ± 0,0086	0,065 ± 0,0328	0,017 ± 0,0029	0,016 ± 0,0003	0,036 ± 0,0024	0,033 ± 0,0040	0,015 ± 0,0022	0,023 ± 0,0024	1,506 ± 0,0227	1,656 ± 0,0168
20	EM5		0,034 ± 0,0009	0,014 ± 0,0014	0,195 ± 0,0017	0,168 ± 0,0093	0,078 ± 0,0317	0,008 ± 0,0035	0,017 ± 0,0013	0,003 ± 0,0044	0,012 ± 0,0021	0,008 ± 0,0031	0,013 ± 0,0051	1,115 ± 0,0471	1,383 ± 0,0314

(1): Mẫu thịt nạc hun khói bằng rom

(2): Mẫu thịt mỡ hun khói bằng rom

(3): Mẫu thịt nạc hun khói bằng hỗn hợp rom và PE (10/1, w/w/)

(4): Mẫu thịt mỡ hun khói bằng hỗn hợp rom và PE (10/1, w/w/)