



Original Article

Characteristics of Airborne Suspended Dust in Hanoi City Using the SEM and PIXE Methods

Hoàng Anh Le^{1,*}, Bui Duy Linh², Nguyen Thanh Tuan²,
Phan Quang Thang³, Nguyen Viet Thanh¹, Pham Thu Huyen¹

¹VNU University of Science, 334 Nguyen Trai, Thanh Xuan, Hanoi, Vietnam

²Joint Vietnam-Russia Tropical Science and Technology Research Center,

63 Nguyen Van Huyen, Nghia Do, Hanoi, Vietnam

³Vietnam Academy of Science and Technology,

18 Hoang Quoc Viet, Hanoi, Vietnam

Received 08th August 2025

Revised 15th September 2025; Accepted 30th September 2025

Abstract: Air pollution has become a pressing global concern due to its multifaceted impacts on the economy, society, and the environment. This study provides an in-depth investigation into the physicochemical pollution levels of Total Suspended Particulate (TSP) in inner-city and suburban areas of Hanoi, during both the dry and rainy seasons. TSP samples were collected using a high-volume air sampler. The morphology and particle size distribution of the TSP samples were analyzed using Field Emission Scanning Electron Microscopy, Scanning Electron Microscopy (SEM) combined with ImageJ software. The TSP samples were subsequently analyzed for major elements using the Particle Induced X-ray Emission (PIXE) method with a dedicated setup on a Pelletron 5SDH-2 accelerator system. The results show that TSP concentrations in the urban area (79.7 - 165.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) were higher than in the suburban area (52.2 - 162.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), and their concentrations in the dry season (60.8 - 165.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) were higher and exhibited greater fluctuation than in the rainy season (52.0 - 124.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Coarse particles (PM_{10}) constituted the majority (>85%) of the TSP. The concentrations of 17 major elements detected in the TSP samples via PIXE were arranged in the following order: $\text{Si} > \text{Ca} > \text{S} > \text{Al} > \text{Na} > \text{K} > \text{Cl} > \text{Fe} > \text{Mg} > \text{Zn} > \text{P} > \text{Ti} > \text{Mn} > \text{Pb} > \text{Cr} > \text{Cu} > \text{Ni}$.

Keywords: Physico-chemical properties, PIXE, TSP, Hanoi.

* Corresponding author.

E-mail address: leha@hus.edu.vn

<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.5425>

Nghiên cứu đặc trưng của bụi lơ lửng trong không khí Thành phố Hà Nội bằng phương pháp kết hợp kỹ thuật phân tích SEM và PIXE

Hoàng Anh Lê^{1,*}, Bùi Duy Linh², Nguyễn Thanh Tuấn²,
Phan Quang Thăng³, Nguyễn Việt Thanh¹, Phạm Thu Huyền¹

¹*Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội,
334 Nguyễn Trãi, Thanh Xuân, Hà Nội, Việt Nam*

²*Phân viện Hóa - Môi trường, Trung tâm Nhiệt đới Việt – Nga,
63 Nguyễn Văn Huyền, Nghĩa Đô, Hà Nội, Việt Nam*

³*Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam,
18 Đường Hoàng Quốc Việt, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 08 tháng 8 năm 2025

Chỉnh sửa ngày 15 tháng 9 năm 2025; Chấp nhận đăng ngày 30 tháng 9 năm 2025

Tóm tắt: Ô nhiễm không khí (ÔNKK) trở thành vấn đề đáng lo ngại trên quy mô toàn cầu bởi các tác động tổng hợp đến kinh tế, xã hội và môi trường. Nghiên cứu này tìm hiểu sâu hơn mức độ ô nhiễm hóa-lý của tổng bụi lơ lửng (TSP) ở khu vực đại diện nội đô và ngoại ô, trong cả mùa khô và mùa mưa của thành phố Hà Nội. Mẫu bụi TSP được thu thập bằng thiết bị lấy mẫu thể tích lớn (TE-5170X, Tisch Environment, Inc.). Hình thái, phân bố cấp hạt của các mẫu TSP được phân tích bằng kính hiển vi điện tử quét phát xạ trường (S-4800, Hitachi, Tokyo, Nhật Bản), kính hiển vi điện tử quét (SEM) kết hợp với phần mềm ImageJ. Các mẫu bụi TSP sau đó được phân tích các nguyên tố chính bằng phương pháp phân tích tia X kích thích bởi chùm hạt tích điện (Particle Induced X-Ray Emission, PIXE) bởi thiết bị đặc dụng trên hệ máy gia tốc Pelletron SSDH-2. Kết quả cho thấy nồng độ TSP ở khu vực đô thị (79,7 - 165,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) cao hơn khu vực ngoại ô (52,2 - 162,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) và nồng độ của TSP trong mùa khô (60,8 - 165,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) cao hơn và dao động lớn hơn trong mùa mưa (52 - 124,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Cấp hạt bụi thô PM_{10} chiếm phần lớn (>85%) trong TSP. Nồng độ của 17 nguyên tố chính có trong mẫu bụi TSP phân tích được bằng phương pháp PIXE và được sắp xếp theo thứ tự giảm dần về nồng độ: $\text{Si} > \text{Ca} > \text{S} > \text{Al} > \text{Na} > \text{K} > \text{Cl} > \text{Fe} > \text{Mg} > \text{Zn} > \text{P} > \text{Ti} > \text{Mn} > \text{Pb} > \text{Cr} > \text{Cu} > \text{Ni}$.

Từ khóa: SEM, PIXE, Ô nhiễm bụi, tổng bụi lơ lửng (TSP), PM_{10} , Hà Nội.

1. Mở đầu

ÔNKK được xem là vấn đề ô nhiễm môi trường chính, gây tổn hại lớn dưới các góc độ về kinh tế, xã hội và môi trường trong kỷ nguyên tới [1, 2]. Nguồn gây ÔNKK bao gồm các hoạt động

tự nhiên (phun trào núi lửa, bão cát sa mạc, cháy rừng tự nhiên, bụi phấn hoa,...) và nhân sinh (hoạt động giao thông vận tải, công nghiệp, nông nghiệp, đốt sinh khối, dân sinh,...). ÔNKK gây nên nhiều tác động như gây mất mỹ quan, giảm năng suất cây trồng, gây biến đổi khí hậu và rất

* Tác giả liên hệ.

Địa chỉ email: leha@hus.edu.vn

<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.5425>

những loại bệnh tật liên quan như gia tăng các loại bệnh tim mạch, hô hấp, viêm tắc nghẽn phổi mạn tính, hen suyễn [1-4].

ÔNKK tại các thành phố lớn ở Việt Nam đang có chiều hướng ngày càng diễn biến xấu. Trong số các đô thị, Hà Nội được xem là khu vực ô nhiễm thuộc nhóm đầu của thế giới [5, 6]. Khi đề cập đến vấn đề ÔNKK thông số về bụi vẫn được quan tâm nhất. Bụi trong không khí được biết đến với các thuật ngữ khác nhau, bao gồm tổng bụi lơ lửng (*Total suspended particulate - TSP*), các hạt bụi có đường kính khí động học nhỏ hơn hoặc bằng $10\text{ }\mu\text{m}$ (PM_{10}), các hạt bụi có đường kính khí động học nhỏ hơn hoặc bằng $2,5\text{ }\mu\text{m}$ (hay còn gọi là bụi mịn - $PM_{2,5}$) và các hạt bụi có kích thước nhỏ hơn, siêu mịn (*ultrafine particles - $PM_{0,1}$*). Tuy nhiên, các nghiên cứu xem xét chủ yếu về nồng độ/hàm lượng của chúng trong môi trường ở mức nào (thường được thể hiện bằng đơn vị $\mu\text{m}/\text{m}^3$, hoặc mg/m^3 ,...). Để đánh giá một cách đầy đủ hơn về tác động của chúng, nồng độ các chất ô nhiễm có trong bụi cần được nghiên cứu thêm để nhận định về độc tính của bụi trong môi trường ở các khu vực, tại các thời điểm khác nhau là hết sức cần thiết. Nồng độ các chất trong bụi được phân tích bằng nhiều phương pháp, kỹ thuật khác nhau, bao gồm các phương pháp như phổ phát xạ nguyên tử plasma cảm ứng (*Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy, ICP-AES*), khối phổ plasma cảm ứng (*Coupled Plasma Mass Spectrometry, ICP-MS*), phân tích tia X kích thích bởi chùm hạt tích điện (*Particle Induced X-Ray Emission, PIXE*), phân tích tán xạ đàn hồi proton (*Proton Elastic Scattering Analysis - PESA*), sắc ký ion (*Ion Chromatography, IC*), phân tích kích hoạt neutron (*Instrumental Neutron Activation Analysis, INAA*), kỹ thuật tán xạ Alpha (*Forward Alpha Scattering Techniques, FAST*), phương pháp tấm tích hợp laser (*Laser Integrated Plate Method, LIPM*). Các phương pháp phân tích nêu trên đều có ưu điểm và hạn chế riêng, tùy thuộc vào bản chất thành phần hạt cần phân tích có trong mẫu bụi [7-10]. Đã có nhiều công trình nghiên cứu so sánh về ưu điểm của PIXE so với các phương pháp khác. Kết quả cho thấy điểm nổi bật của phương pháp PIXE mà các phương

pháp khác không có được do PIXE là phương pháp phân tích tiên tiến, hiện đại, không phá hủy mẫu cơ bản ban đầu [7-12]. Từ đầu những năm 1970, các nhà khoa học đã sử dụng phương pháp PIXE để phân tích thành phần hóa học của hạt bụi [7]. Các nhà khoa học nhận thấy PIXE có thể phân tích đồng thời nhiều nguyên tố với khoảng điện tích nguyên tố Z rộng cùng độ nhạy phân tích cao, cỡ ppm và thời gian phân tích ngắn [9, 12], có thể đánh giá tốt hơn tác động của kim loại nặng đến môi trường và sức khỏe con người [10]. Ngày nay, với ưu điểm vượt trội, phương pháp PIXE được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực như khoa học môi trường, y học, thực phẩm, khảo cổ học [9, 11].

Trong nghiên cứu này, các mẫu bụi TSP được thu thập tại hai khu vực đại diện (*nội đô và ngoại ô*) trong mùa khí hậu đặc trưng đại diện (*mùa mưa và mùa khô*) thành phố Hà Nội để đánh giá toàn diện hơn về hàm lượng của các nguyên tố có trong bụi không khí. Mẫu bụi TSP được đánh giá về phân bố cấp hạt và hình thái bằng phương pháp chụp ảnh kính hiển vi điện tử quét (*Scanning Electron Microscope - SEM*) và phần mềm xử lý hình ảnh ImageJ. Nồng độ các nguyên tố trong mẫu bụi TSP được phân tích bằng phương pháp PIXE để bước đầu nhận định nguồn gây ra ô nhiễm bụi trong không khí, làm gia tăng mức độ ô nhiễm và độc tính của chúng đối với sức khỏe cộng đồng. Nghiên cứu này giới thiệu với các nhà khoa học môi trường về sự kết hợp các phương pháp mới, hiện đại, độc đáo nhằm ứng dụng và phát triển định hướng nghiên cứu về thành phần, tính chất lý - hóa của bụi không khí và các chủ đề có liên quan.

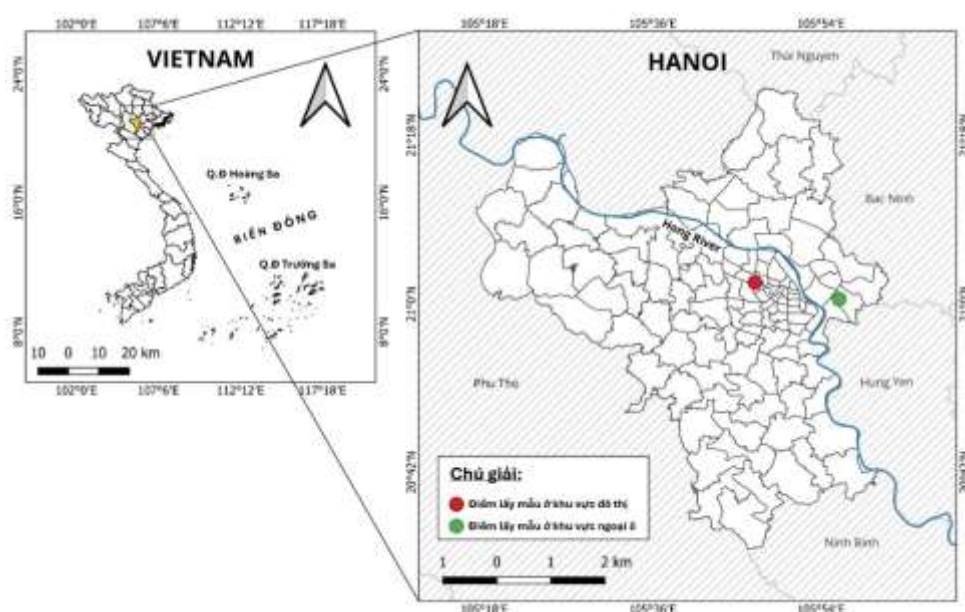
2. Phương pháp quan trắc và phân tích mẫu tổng bụi lơ lửng TSP trong không khí

2.1. Quan trắc mẫu tổng bụi lơ lửng TSP trong không khí

Mẫu bụi mịn TSP được quan trắc tại 2 địa điểm là khuôn viên Trường Đại học Công nghệ, Đại học Quốc gia Hà Nội (144 Xuân Thủy, Cầu Giấy, Hà Nội) và Học viện Nông nghiệp Việt Nam (xã Gia Lâm, thành phố Hà Nội), tương ứng

đại diện khu vực đô thị và ngoại ô thành phố Hà Nội (Hình 1). Các mẫu TSP được phân bố theo thời gian trong điều kiện thời tiết khu vực có hai mùa rõ rệt là mùa mưa (từ tháng 5 đến tháng 11) và mùa khô (từ tháng 12 đến tháng 4 năm sau). Mẫu bụi TSP được thu bằng thiết bị lấy mẫu thể tích lớn (high volume air sampler - HVAS, Tisch Model TE-5170X, Tisch Environment, Inc.). Tốc độ dòng hút được thiết lập và duy trì ổn định ở mức 240 L/phút. Giấy lọc bắt mẫu làm bằng vật liệu Quartz, đường kính 102 mm. Thiết bị HVAS đặt trên nóc nhà mái bằng, xung quanh không có vật chắn, độ cao 12 - 15 m so với mặt đất. Thời gian thu mẫu được cài đặt tự động, bắt

đầu từ khoảng 6h00 sáng đến 5h50 ngày hôm sau. Các mẫu được lấy liên tục tạo thành mẫu bụi TSP theo ngày. Quản lý ký hiệu mẫu bụi TSP bao gồm: địa điểm nội đô (U - urban), ngoại ô (S - suburban), mùa mưa (W), mùa khô (D) và số thứ tự mẫu. Như vậy nghiên cứu sẽ bao gồm mẫu bụi TSP được lấy tại khu vực đô thị trong mùa khô (UD), khu vực đô thị trong mùa mưa (UW), khu vực ngoại ô trong mùa khô (SD), khu vực ngoại ô trong mùa mưa (SW). Ký hiệu mẫu UD - 1 được hiểu là mẫu bụi TSP được lấy tại Trường Đại học Công nghệ, vào mùa khô, ngày lấy mẫu thứ 1 trong chu kỳ lấy mẫu.



Hình 1. Bản đồ vị trí lấy mẫu bụi TSP tại Hà Nội, Việt Nam

2.2. Phương pháp cân trọng lượng và phân tích hình thái bụi lơ lửng TSP

Giấy lấy mẫu bụi được sấy khô ở nhiệt độ 110 °C. Sau khi thu mẫu, giấy lấy mẫu có chứa mẫu bụi được bảo quản trong hộp đựng petri thủy tinh chuyên dụng, chuyển về phòng thí nghiệm và sấy ở nhiệt độ 110 °C trước khi cân trọng lượng bằng thiết bị cân Mettler Toledo XS205, có thang đọc kết quả 10^{-6} mg, ở nhiệt độ phòng thí nghiệm 25 °C. Quy trình phân tích được thực hiện theo tiêu chuẩn kỹ thuật bởi Cơ

quan bảo vệ môi trường Mỹ (U.S. EPA) IO-3.5 [13]. Kết quả nồng độ bụi được tính bằng công thức sau:

$$C = \frac{M_2 - M_1}{V} \quad (1)$$

Trong đó:

C: nồng độ bụi ($\mu\text{g}/\text{m}^3$);

M1: khối lượng giấy lọc trước khi lấy mẫu (μg);

M2: khối lượng [giấy lọc + bụi TSP] sau khi lấy mẫu (μg);

V: tổng thể tích dòng khí lấy mẫu trong suốt thời gian lấy mẫu (m^3).

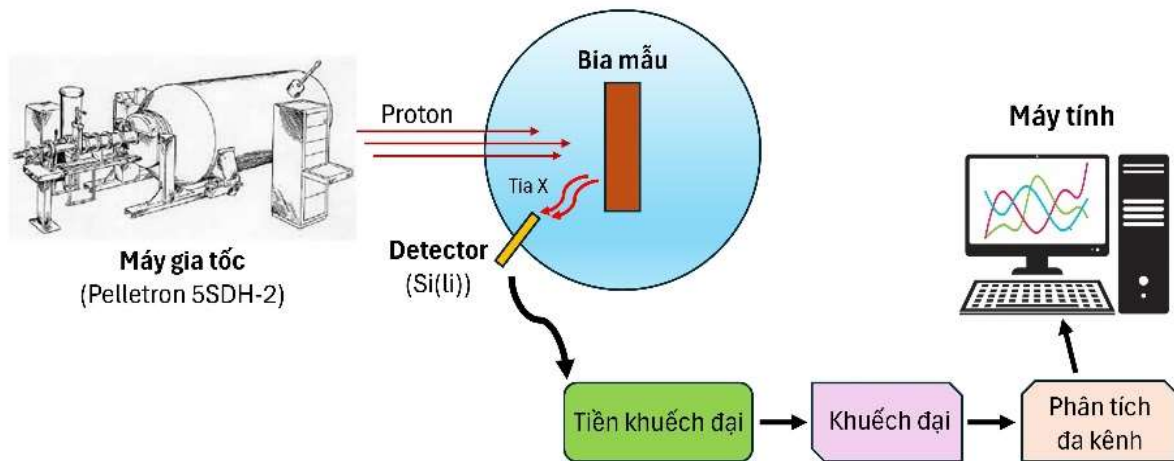
2.3. Phương pháp phân tích hình thái bụi lơ lửng TSP

Sự phân bố cấp độ hạt có trong mẫu bụi TSP được xác định bằng phương pháp sử dụng hệ kính hiển vi điện tử quét SEM. SEM là một loại kính hiển vi điện tử có thể tạo ra ảnh với độ phân giải cao của bề mặt mẫu vật bằng cách sử dụng một chùm điện tử hẹp quét trên bề mặt mẫu. Hình thái của các mẫu TSP được phân tích bằng kính hiển vi điện tử quét phát xạ trường (S-4800, Hitachi, Tokyo, Nhật Bản) tại Trung tâm Nhiệt đới Việt - Nga. Kính hiển vi điện tử quét (SEM) kết hợp với phần mềm ImageJ đã cung cấp thông tin về hình thái bề mặt và phân bố kích thước của

TSP trong môi trường. Kỹ thuật này đã được sử dụng thành công, đảm bảo độ tin cậy về khoa học [14].

2.4. Phương pháp phân tích phát xạ tia X kích thích bởi chùm hạt

Thành phần vật chất (các nguyên tố) trong các mẫu bụi TSP được phân tích bằng phương pháp PIXE. Các phép đo được thực hiện tại buồng phân tích RC43 được lắp đặt trên đường chùm tia 45° bên trái trên hệ máy gia tốc Pelletron 5SDH-2 thuộc Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội. Sơ đồ phân tích được thể hiện trên Hình 2.



Hình 2. Sơ đồ phân tích PIXE sử dụng detector trường cuộn SDD trên hệ máy gia tốc Pelletron 5SDH-2.

Phân tích được thực hiện bằng hai phép đo: phép đo năng lượng thấp để xác định ma trận mẫu và phép đo năng lượng cao để xác định các nguyên tố vết. Cả hai phép đo đều sử dụng chùm proton với năng lượng lần lượt là 830 keV và 2615 keV. Chùm proton được sử dụng có kích thước 0,5 * 0,5 cm² để đảm bảo toàn bộ chùm tia tới đều tương tác với mẫu đo. Một bộ đếm dòng được nối với bia để đo chính xác dòng của chùm proton. Điện tích tích lũy trên mỗi mẫu là 10-30 μ C và thời gian đo khoảng 15-30 phút. Tấm hấp thụ Mylar được đặt giữa detector và mẫu đo để làm

giảm tia X mềm và nhiễu được sinh ra. Detector trường cuộn SDD (Silicon Drift Detector) được đặt ở góc 32,8° để ghi nhận tia X sinh ra. Phần mềm RC43 kết nối với hệ điện tử và bộ đếm dòng để ghi nhận phổ tia X và tổng dòng proton chiếu vào mẫu. Phần mềm GUPIXWIN version 2.2.3 được sử dụng để phân tích phổ tia X. Giá trị hàm lượng được tính bằng ppm (mg/kg). Giới hạn phát hiện từ khoảng 1,7 đến 512 ppm tùy thuộc và nguyên tố [4, 9]. Các thông số cơ bản được sử dụng trong phương pháp PIXE được thể hiện tóm tắt qua Bảng 1.

Bảng 1. Tóm tắt thông số cơ bản được sử dụng trong phép phân tích PIXE trên hệ máy gia tốc Pelletron 5SDH-2

Thông số	Đơn vị	Phép đo năng lượng thấp	Phép đo năng lượng cao
Năng lượng chùm proton	keV	830	2615
Tổng điện tích tại mẫu Q	μC	10	30
Cường độ chùm tia	nA	10	12
Kích thước chùm tia tại mẫu (<i>beam spot</i>)	cm ²	0,5 x 0,5	0,5 x 0,5
Độ dày tấm lọc Mylar	μm	12	100

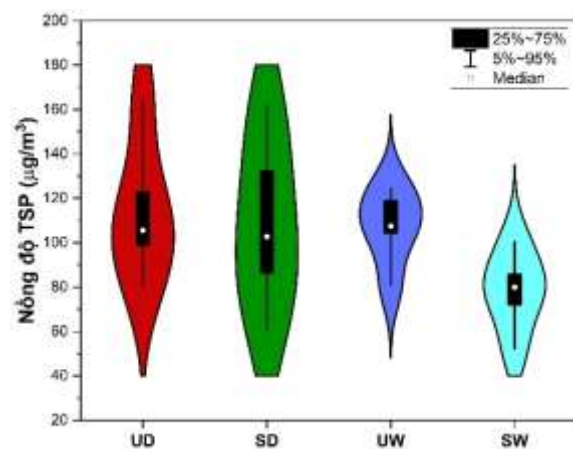
3. Kết quả và thảo luận

3.1. Nồng độ, cấu trúc hình thái, phân bố cấp hạt của bụi lơ lửng TSP trong không khí thành phố Hà Nội

Nồng độ bụi TSP trong thời gian lấy mẫu tại khu vực đô thị và ngoại ô thành phố Hà Nội được thể hiện trong Hình 3. Theo kết quả quan trắc, nồng độ TSP (Mean $\pm$ SD) ở UD, SD, UW, SW lần lượt là: $105,5 \pm 32,4 \mu g/m^3$, $102,8 \pm 39,5 \mu g/m^3$, $107,5 \pm 17,1 \mu g/m^3$, $80,1 \pm 18,1 \mu g/m^3$. Trong các mẫu thu thập được, kết quả phân tích cho thấy nồng độ bụi TSP ở thành phố Hà Nội không vượt giá trị giới hạn tối đa các thông số cơ bản trong không khí xung quanh (QCVN 05:2013/BTNMT = $200 \mu g/m^3$). Nồng độ TSP ở khu vực đô thị ($79,7 - 165,5 \mu g/m^3$) cao hơn khu vực ngoại ô ($52,2 - 162,2 \mu g/m^3$) và nồng độ của chúng trong mùa khô ($60,8 - 165,5 \mu g/m^3$) cao hơn và dao động lớn hơn trong mùa mưa ($52 - 124,8 \mu g/m^3$). Trong mùa mưa, nồng độ TSP ở ngoại ô có biểu hiện thấp hơn đáng kể so với vùng nội đô. Tuy nhiên xu thế này là không rõ rệt vào mùa khô.

Hiện nay không có nhiều nghiên cứu tập trung vào đối tượng TSP, mà chủ yếu tập trung vào các loại bụi có kích thước hạt nhỏ hơn như PM₁₀, PM_{2.5}, PM_{1.0} hoặc PM_{0.1}. Các trạm quan trắc chất lượng không khí quốc gia cũng tập trung quan trắc bụi PM₁₀, PM_{2.5}. Do vậy không có nhiều kết quả nghiên cứu được thực hiện trong giai đoạn gần đây ở trong nước để so sánh, đánh giá. Nồng độ trung bình ngày của TSP đo được tại thành phố Hà Nội trong nghiên cứu này cao hơn nhiều so với nồng độ TSP đo được tại thành phố Hồ Chí Minh năm 2019 ở cả mùa khô

($58,2 \pm 15,9 \mu g/m^3$) và mùa mưa ($55,0 \pm 23,5 \mu g/m^3$) [15]. Tương tự nó cũng cao hơn so với nồng độ TSP ở thành phố Biên Hòa, tỉnh Đồng Nai vào mùa khô và mùa mưa năm 2023 tương ứng là $97,4 \pm 11,4 \mu g/m^3$ và $71,5 \pm 10,3 \mu g/m^3$ [16]. So với một số quốc gia xung quanh, kết quả nghiên cứu này cao hơn ở Thái Lan ($58,3 \pm 7,8 \mu g/m^3$), năm 2019 [17]. Tuy vậy nồng độ TSP ở Hà Nội vẫn thấp hơn nhiều so với nồng độ TSP tại 47 điểm đo khác nhau ở thành phố Delhi của Ấn Độ vào năm 2019, đã được công bố bởi Jangirh và cộng sự (2022) [18].

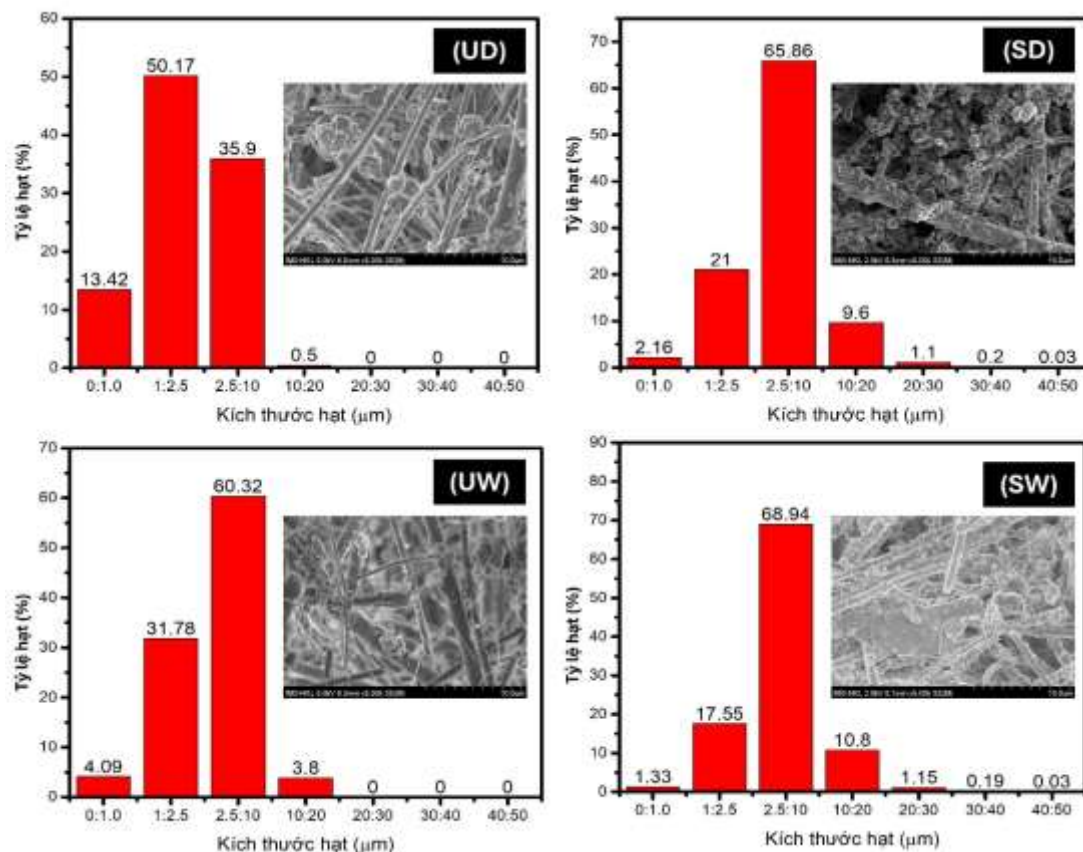


Hình 3. Phân bố nồng độ TSP tại khu vực Hà Nội.

Kết quả phân tích hình thái hạt bụi và phân bố cấp hạt bằng kỹ thuật SEM được thể hiện trong Hình 4. Mật độ hạt tập trung khá lớn gây trở ngại cho việc phân tích phân bố cấp hạt. Tuy nhiên, phương pháp SEM kết hợp với phần mềm ImageJ đã được chúng tôi báo cáo thành công qua các công trình nghiên cứu của Linh và cộng sự (2023). Với các mẫu bụi TSP thu được, kết

quả cho thấy hạt bụi PM_{10} chiếm tỷ lệ lớn (>85%). Đáng chú ý là tỷ lệ bụi mịn $PM_{2.5}$ ở khu vực đô thị (UD = 63,6%, UW = 35,9%) có xu hướng cao hơn ở khu vực ngoại ô (SD = 23,2%, SW = 18,9 %). Xu thế tương tự với bụi siêu mịn $PM_{0.1}$ ở khu vực đô thị (UD = 13,4%, SD = 4,1%) lớn hơn khu vực ngoại ô (SD = 2,16%, SW =

1,3%). Bụi siêu mịn $PM_{0.1}$ có xu hướng cao hơn trong mùa khô (UD = 13,4%, SD = 2,16%) so với mùa mưa (UW = 4,1%, SW = 1,3%). Điều này cho thấy chất lượng không khí thành phố Hà Nội có thể bị ảnh hưởng lớn từ nguồn phát thải bên ngoài địa phương, khi mà các hạt bụi kích thước nhỏ có khả năng làm truyền đi xa [3, 14].

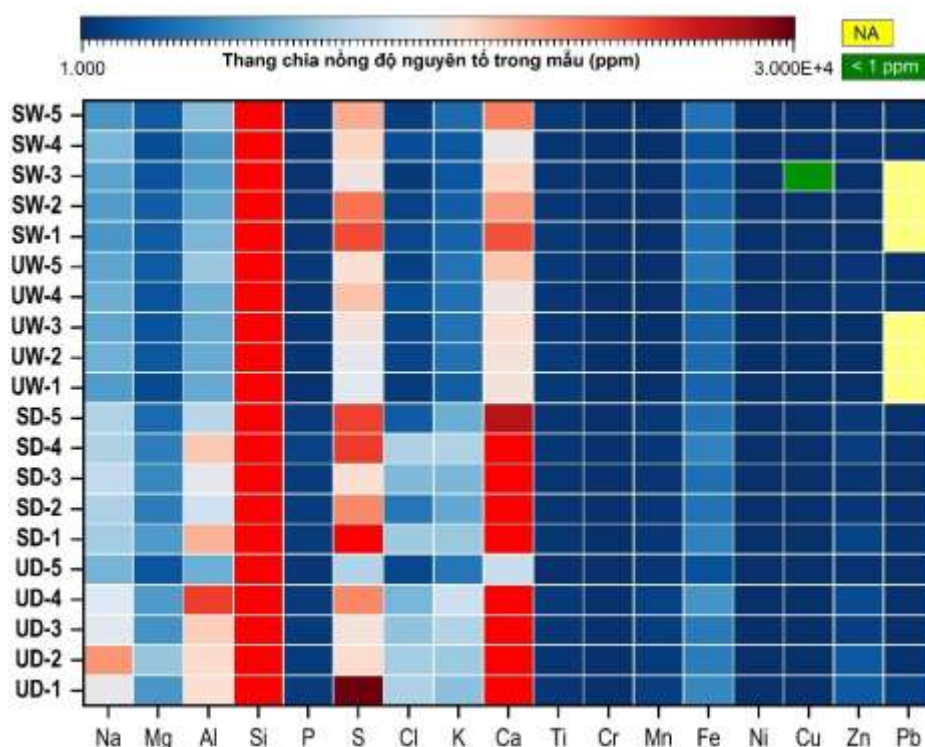


Hình 4. Tỷ lệ phân bố cấp hạt và ảnh SEM (mẫu đại diện) của bụi TSP tại thành phố Hà Nội.

3.2. Nồng độ các nguyên tố chính trong bụi lơ lửng TSP trong không khí thành phố Hà Nội

Sự phân bố nồng độ theo bản đồ nhiệt (heatmap) của các nguyên tố trong bụi TSP ở thành phố Hà Nội được thể hiện trong Hình 5. Nhìn chung nồng độ các nguyên tố xuất hiện trong mẫu bụi TSP ở khu vực đô thị cao hơn ở khu vực ngoại ô. Nồng độ trung bình của các nguyên tố (phân tích bằng phương pháp PIXE) trong các mẫu bụi TSP được sắp xếp theo thứ tự:

Si>Ca>S>Al>Na>K>Cl>Fe>Mg>Zn>P>Ti>Mn>Pb>Cr>Cu>Ni. Trật tự này tương đồng với nghiên cứu có trước về nồng độ các nguyên tố trong bụi khí quyển được công bố bởi Papp và cộng sự (2020). Kết quả nghiên cứu này cho thấy xuất hiện 3 nhóm (clusters), bao gồm nhóm các nguyên tố có nồng độ ở mức cao (Si, Ca, S), trung bình (Na, Mg, Al, K, Fe và Cl) và nhóm có mức thấp bao gồm các nguyên tố còn lại (Zn, P, Ti, Mn, Pb, Cr, Cu, Ni).



Hình 2. Nồng độ các nguyên tố chính trong bụi TSP Thành phố Hà Nội.

Như vậy các nguyên tố phổ biến nhất trong các mẫu bụi TSP, bao gồm các nguyên tố ở nhóm có mức cao và trung bình, là các nguyên tố phổ biến nhất trong vỏ trái đất, trừ S và Cl. Kết quả này rất tương đồng với kết quả mà Quyet và cộng sự (2021) đã phát hiện trong bụi được bắt dính trên các túi cây rêu *Sphagnum girgensohnii*. Điều đó chứng tỏ mật độ bụi tinh thể trong không khí Hà Nội rất cao và loại bụi này là một trong những nguồn ô nhiễm chính. Điều này dễ dàng được lý giải là do tốc độ đô thị hóa của Hà Nội rất nhanh. Theo đó nồng độ Si xuất hiện cao nhất trong tất cả các mẫu với sự dao động trong giải 231.803 - 382.563 ppm. Điều chú ý là giá trị nồng độ cao nhất của Si (382.563 ppm) và giá trị nồng độ thấp nhất của nó (231.803 ppm) đều nhận được trong mùa khô ở khu vực đô thị. Thành phần Si trong các mẫu chiếm từ 63% - 88% tổng hàm lượng các nguyên tố được phát hiện. Điều này cho thấy nồng độ nguyên tố trong bụi có thể phụ thuộc rất nhiều vào các điều kiện khác nhau, mang tính bất ổn định mạnh giữa khu

vực đô thị so với vùng nông thôn như các điều kiện về địa hình, khí tượng, nguồn thải và các hoạt động kinh tế - xã hội khác.

Các nguyên tố khoáng (Si, Ca, Fe) có tỷ lệ cao trong bụi do kết quả hoạt động phương tiện giao thông đường bộ nhộn nhịp [4]. Hàm lượng các nguyên tố Si, Ca, Al, Fe, K và Mg cao cũng là chỉ thị cho các nguồn thải từ hoạt động xây dựng và nông nghiệp [19]. Nồng độ Pb là thấp nhất, không xuất hiện (*dưới ngưỡng phân tích hoặc không có*) ở một số mẫu bụi TSP được lấy vào 3 ngày đầu lấy mẫu ở mùa mưa, cả khu vực đô thị (UW-1, UW-2, UW-3) và ngoại ô thành phố Hà Nội (SW-1, SW-2, SW-3). Hàm lượng Pb thấp trong không khí là tín hiệu đáng mừng, rất có thể là kết quả mà Việt Nam nói chung, Hà Nội nói riêng trong quyết định không sử dụng xăng pha chì từ 1/11/2001. Thêm vào đó sự tăng nhanh về tỷ lệ phương tiện sử dụng pin điện thay thế cho các loại phương tiện sử dụng xăng, dầu cũng là yếu tố thúc đẩy sự suy giảm các chất ÔNKK từ động cơ đốt trong.

4. Kết luận

Nghiên cứu này đã thu thập được tổng số 20 mẫu bụi TSP ở khu vực đại diện nội đô và ngoại ô, trong cả mùa khô và mùa mưa của thành phố Hà Nội. Mười bảy (17) nguyên tố trong bụi TSP được phân tích thành công bằng phương pháp PIXE bởi thiết bị đặc dụng trên hệ máy gia tốc Pelletron 5SDH-2. Kết quả cho thấy nồng độ TSP ở UD, SD, UW, SW lần lượt là $105,5 \pm 32,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $102,8 \pm 39,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $107,5 \pm 17,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $80,1 \pm 18,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Nồng độ TSP ở khu vực nội đô ($79,7 - 165,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) cao hơn khu vực ngoại ô ($52,2 - 162,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) và nồng độ của chúng trong mùa khô ($60,8 - 165,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) thì cao hơn và dao động lớn hơn trong mùa mưa ($52 - 124,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Cấp hạt bụi thô PM_{10} chiếm phần lớn ($>85\%$) trong TSP. Sự xuất hiện các nguyên tố trong mẫu bụi TSP ($\text{Si}>\text{Ca}>\text{S}>\text{Al}>\text{Na}>\text{K}>\text{Cl}>\text{Fe}>\text{Mg}>\text{Zn}>\text{P}>\text{Ti}>\text{Mn}>\text{Pb}>\text{Cr}>\text{Cu}>\text{Ni}$) cho thấy chất lượng không khí của thành phố có thể ảnh hưởng lớn từ các nguồn giao thông, xây dựng, hoạt động nông nghiệp và các nguồn lan truyền từ xa. Các nghiên cứu tiếp theo cần chú ý nồng độ các nguyên tố này trong các loại bụi kích thước nhỏ hơn ($\text{PM}_{2.5}$, PM_1 , $\text{PM}_{0.1}$) bởi sự phân bố các loại bụi này chiếm ưu thế trong toàn bộ bụi TSP.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển Khoa học và Công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số 105.08-2023.28. Các mẫu bụi TSP thuộc đề tài NAFOSTED, các chỉ tiêu nguyên tố được phân tích bằng thiết bị PIXE trên máy gia tốc Pelletron 5SDH-2 bởi nhóm tác giả.

Tài liệu tham khảo

- [1] R. D. Brook, J. R. Brook, S. Rajagopalan, Air Pollution: The Heart of the Problem, *Current Hypertension Reports*, Vol. 5, No. 1, 2003, pp. 32-39, <https://doi.org/10.1007/s11906-003-0008-y>.
- [2] I. Manisalidis, E. Stavropoulou, A. Stavropoulos, E. Bezirtzoglou, *Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review*, *Frontiers in Public Health*, Vol. 8, 2020, pp. 14, <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014>.
- [3] T. T. Hien, D. H. Huy, P. A. Dominutti, N. D. T. Chi, J. R. Hopkins, M. Shaw, G. Forster, G. Mills, H. A. Le, D. Oram, *Comprehensive Volatile Organic Compound Measurements and Their Implications for Groundlevel Ozone Formation in the Two Main Urban Areas of Vietnam*, *Atmospheric Environment*, Vol. 269, 2022, pp. 118872, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118872>.
- [4] E. Papp, D. Nagy, Z. Szoboszlai, A. Angyal, Z. Török, Á. Csepregi, E. Furu, Z. Kertesz, *Investigation of Aerosol Pollution Inside Trams in Debrecen, Hungary*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, Vol. 477, 2020, pp. 138-143, <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2019.09.054>.
- [5] IQAir, 2024 World Air Quality Report, <https://www.iqair.com/world-air-quality-report>, 2025 (accessed on: August 5th, 2025).
- [6] J. H. Li, T. T. T. Nguyen, K. G. Duong, *Evaluation of Economic Development Process on Environmental Pollution Status in Hanoi, Vietnam*, *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 295, 2013, pp. 992-998, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.295-298.992>.
- [7] G. Hudson, H. Kaufmann, J. Nelson, M. Bonacci, *Advances in the Use of PIXE and PESA for Air Pollution Sampling*, *Nuclear Instruments and Methods*, Vol. 168, No. 1-3, 1980, pp. 259-263, [https://doi.org/10.1016/0029-554X\(80\)91263-X](https://doi.org/10.1016/0029-554X(80)91263-X).
- [8] W. Maenhaut, N. Raes, W. Wang, *Analysis of Atmospheric Aerosols By Particle-induced X-ray Emission, Instrumental Neutron Activation Analysis, and Ion Chromatography*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, Vol. 269, No. 22, 2011, pp. 2693-2698, <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2011.08.012>.
- [9] N. H. Quyet, D. V. Thang, P. D. Khue, P. T. Nam, N. V. Khanh, N. T. Oanh, L. T. Hoa, C. D. Viet, L. H. Khiem in *Active Moss Biomonitoring Technique for Atmospheric Elemental Contamination in Hanoi Using Proton Induced X-Ray Emission*, *Vietnam Conference on Nuclear Science and Technology VINANST-14*, Agenda and Abstracts, 2021, pp. 9.
- [10] R. Traversi, S. Becagli, G. Calzolari, M. Chiari, M. Giannoni, F. Lucarelli, S. Nava, F. Rugi,

- M. Severi, R. Udisti, A Comparison Between PIXE and ICP-AES Measurements of Metals in Aerosol Particulate Collected in Urban and Marine Sites in Italy, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, Vol. 318, 2014, pp. 130-134, <http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2013.05.102>.
- [11] B. T. Hoa, N. T. Nghia, V. H. Phong, T. T. Anh, Evaluation of Thick Target PIXE Analysis in The 5SDH-2 Pelletron Accelerator Facility at VNU University of Science, *VNU Journal of Science: Mathematics-Physics*, Vol. 37, No. 4, 2021, <https://doi.org/10.25073/2588-1124/vnumap.4623>.
- [12] L. H. Khiem, N. T. Nghia, V. H. Phong, B. V. Loat, Proton Induced X-ray Emission (PIXE) Analysis on Thick Samples at HUS 5SDH-2 Tandem Accelerator System, *Communications in Physics*, Vol. 24, No. 3S2, 2014, pp. 1-7, <https://doi.org/10.15625/0868-3166/24/3S2/5013>.
- [13] USEPA, IO Compendium Method IO-3.5: Compendium of Methods for the Determination of Inorganic Compounds in Ambient Air: Determination of Metals in Ambient Particulate Matter Using Inductively Coupled Plasma/Mass Spectrometry (ICP/MS), EPA/625/R-96/010a. Cincinnati, OH., 1999.
- [14] B. D. Linh, H. A. Le, N. X. Truong, Physico-chemical Properties and Transboundary Transport of PM_{2.5} in Bien Hoa City, Dong Nai Province, Southeastern Vietnam, *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 30, No. 13, 2023, pp. 36533-36544, <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24801-z>.
- [15] N. T. Thuan, N. D. Dat, N. M. Ngoc, N. T. T. Hoang, T. T. Hien, M. B. Chang, Atmospheric Polychlorinated Naphthalenes in a Tropical Megalopolis of Vietnam: Concentrations, Potential Sources, and Health Risk, *Aerosol and Air Quality Research*, Vol. 24, No. 8, 2024, pp. 240047, <https://doi.org/10.4209/aaqr.240047>.
- [16] N. T. Tuan, L. H. Anh, B. D. Linh, N. D. Thang, N. T. T. Ly, N.T. Thu, V. T. Hieu, Characterizing Aerosol Particulate Matter in Bien Hoa City, Dong Nai Province: Mass Concentration Levels, Ratios, and Long-Range Transport by HYSPLIT Model, *Journal of Tropical Science and Engineering*, Vol. 39, 2025, pp. 2-13, <https://doi.org/10.58334/vrtc.jtst.n39.745>.
- [17] M. Inerb, W. Phairuang, P. Paluang, M. Hata, M. Furuuchi, P. Wangpakattananawong, Carbon and Trace Element Compositions of Total Suspended Particles (TSP) and Nanoparticles (PM_{0.1}) in Ambient Air of Southern Thailand and Characterization of Their Sources, *Atmosphere*, Vol. 13, No. 4, 2022, pp. 626, <https://doi.org/10.3390/atmos13040626>.
- [18] R. Jangirh, S. Ahlawat, R. Arya, A. Mondal, L. Yadav, G. Kotnala, P. Yadav, N. Choudhary, M. Rani, R. Banoo, Gridded Distribution of Total Suspended Particulate Matter (TSP) and Their Chemical Characterization Over Delhi During Winter, *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 29, 2022, pp. 17892-17918, <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16572-w>.
- [19] R. R. Leal, Elemental Morphological and Chemical Characterization of Individual TSP Particles by SEM-EDS, Microscopy and Microanalysis, Vol. 26, No. S2, 2020, pp. 2202-2204, <https://doi.org/10.1017/S1431927620020796>.