

Phân tích hình thái, cấp độ hạt và sự phát thải tầm xa của bụi mịn trong môi trường không khí tại khu vực ngoại thành Thành phố Hà Nội

Bùi Duy Linh^{(1)✉}, Nguyễn Đức Thắng⁽¹⁾, Hoàng Anh Lê⁽²⁾, Nguyễn Thị Năng⁽¹⁾

⁽¹⁾ Viện Hóa học và Môi trường nhiệt đới,
 Trung tâm Nhiệt đới Việt - Nga, Hà Nội,
 Việt Nam

⁽²⁾ Khoa Môi trường, Trường Đại học Khoa
 học Tự nhiên - Đại học Quốc gia Hà Nội,
 Việt Nam

✉ Tác giả liên hệ

E-mail: buiduylinh1105@gmail.com

ORCID: 0009-0008-9202-1891

Trích dẫn bài báo

Bùi, D. L., Nguyễn, Đ. T., Hoàng, A. L., Nguyễn, T. N. (2026). Phân tích hình thái, cấp độ hạt và sự phát thải tầm xa của bụi mịn trong môi trường không khí tại khu vực ngoại thành Thành phố Hà Nội. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Nhiệt đới*, 15(3), 2-9. <https://doi.org/10.58334/vrtc.jtst.vol.015.881>

Tóm tắt

Nghiên cứu này đánh giá biến động theo mùa, đặc điểm hình thái và nguồn gốc vận chuyển của bụi mịn PM_{2.5} tại một điểm quan trắc thuộc khu vực ngoại thành Hà Nội trong giai đoạn mùa khô và mùa mưa năm 2025. Mẫu PM_{2.5} được thu bằng thiết bị lấy mẫu bụi thể tích lớn (Tisch Environment, Inc.), sau đó phân tích hình thái hạt bằng kính hiển vi điện tử quét (SEM) và đánh giá nguồn vận chuyển bằng mô hình quỹ đạo ngược HYSPLIT. Kết quả quan trắc cho thấy nồng độ PM_{2.5} trung bình mùa khô đạt $104,68 \pm 64,83 \mu\text{g}/\text{m}^3$, vượt đáng kể giới hạn QCVN 05:2023/BTNMT, trong khi mùa mưa duy trì ở mức thấp hơn là $46,41 \pm 20,02 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Phân tích hình thái học cho thấy trong mùa khô, các hạt kích thước 0,1 - 1,0 μm chiếm tỷ lệ cao nhất (80,7%) chủ yếu tồn tại dưới dạng kết tụ chuỗi và cụm đặc trưng cho nguồn phát thải đốt cháy. Ngược lại, mùa mưa cho thấy vai trò quan trọng của quá trình lắng đọng ướt trong việc loại bỏ các hạt siêu mịn ($<0,1 \mu\text{m}$) khỏi khí quyển. Kết quả mô hình HYSPLIT khẳng định ô nhiễm mùa khô chịu tác động mạnh bởi sự tích tụ bụi từ các khối khí lục địa di chuyển đường dài trên đất liền từ phía Bắc, trong khi gió mùa Tây Nam/Đông Nam mang theo khối khí biển sạch giúp pha loãng ô nhiễm trong mùa mưa. Nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học thực nghiệm về mối liên hệ chặt chẽ giữa điều kiện khí tượng, đặc điểm vi mô của hạt và mức độ ô nhiễm không khí đô thị.

Từ khoá

Hình thái hạt; HYSPLIT; PM_{2.5}; SEM.

Đặt vấn đề

Hiện nay, bụi PM_{2.5} (với đường kính $\leq 2,5 \mu\text{m}$) được coi là một trong sáu chất gây ô nhiễm không khí phổ biến nhất (United States Environmental Protection Agency, 2020). Bụi PM_{2.5} không chỉ gây ô nhiễm không khí toàn cầu quan trọng mà chúng còn gây nên những tác động đáng kể đối với sức khỏe con người (Engel-Cox và cộng sự, 2013). Do chúng có kích thước rất nhỏ nên các hạt mịn có thể xâm nhập sâu vào cơ thể con người thông qua hệ hô hấp đến tim và vào máu gây ảnh hưởng nghiêm trọng đến sức khỏe con người (Bui và cộng sự, 2022). Nguồn phát sinh cũng như đặc trưng vật lý của bụi PM_{2.5} bao gồm kích thước và hình thái hạt hiện nay đang được đẩy mạnh nghiên cứu nhằm xác định rõ vai trò và mức độ ảnh hưởng của chúng đối với môi trường và sức khỏe con người. Từ các kết quả thu được trong thời gian gần đây cho thấy tác động của các sol khí phụ thuộc chặt chẽ vào hình thái phân bố, kích thước hạt có thể thấy xu hướng chung là khi kích thước các hạt mịn càng nhỏ thì sự tác

động của chúng đối với sức khỏe con người càng lớn (Jiang và cộng sự, 2018; Linh và cộng sự, 2023). Trong nghiên cứu của Arhami và cộng sự (2010) đã chỉ ra kích thước hạt đóng vai trò quan trọng tốc độ lắng đọng của các hạt và sol khí hít vào các vùng khác nhau của hệ hô hấp con người. Theo báo cáo Tổ chức Y tế thế giới (WHO, 2025) ô nhiễm không khí liên quan đến PM_{2.5} và các yếu tố khác gây ra khoảng 7 triệu ca tử vong sớm mỗi năm trên thế giới.

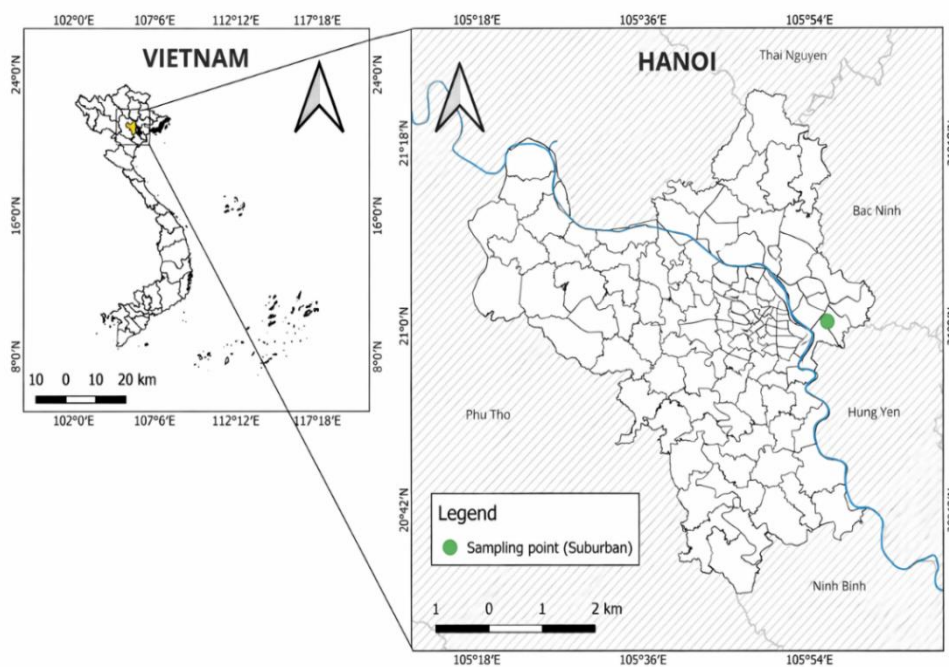
Hiện nay, hoạt động quan trắc chất lượng không khí tự động tại Việt Nam chủ yếu được triển khai tại các đô thị lớn như Hà Nội và Thành phố Hồ Chí Minh. Trong những năm gần đây, các kết quả theo dõi chỉ số chất lượng không khí (AQI) tại Hà Nội cho thấy tình trạng ô nhiễm ngày càng nghiêm trọng, với nhiều thời điểm thành phố được ghi nhận nằm trong nhóm các khu vực ô nhiễm nhất thế giới; hiện tượng này xuất hiện với tần suất ngày càng cao và tập trung chủ yếu trong mùa khô. Hà Nội là đô thị có mật độ dân số đứng thứ hai trên cả nước, nơi diễn ra liên tục các hoạt động giao thông, xây dựng và sinh hoạt dân sinh,

làm gia tăng áp lực ô nhiễm không khí. Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu về bụi mịn $PM_{2.5}$ tại Hà Nội, phần lớn các công trình hiện nay chủ yếu tập trung vào đặc tính hóa học của bụi (Cohen và cộng sự, 2010; Dat và cộng sự, 2024; Thuy, 2023), trong khi các nghiên cứu chuyên sâu về đặc tính vật lý, bao gồm hình thái và phân bố kích thước hạt những yếu tố quyết định mức độ xâm nhập và tác động đến sức khỏe con người vẫn còn hạn chế. Trước thực tế đó, nghiên cứu này được thực hiện nhằm đánh giá sự biến thiên theo mùa của nồng độ khối lượng $PM_{2.5}$ trong mùa mưa (RS) và mùa khô (DS) tại ngoại thành Thành phố Hà Nội. Bên cạnh việc phân tích nồng độ, hình thái và kích thước hạt $PM_{2.5}$ nghiên cứu đã kết hợp mô hình quỹ đạo tích hợp Lagrangian đơn hạt lai (HYSPLIT) được áp dụng nhằm xác định các nguồn phát thải tiềm năng và đánh giá ảnh hưởng của quá trình vận chuyển khí quyển đến khu vực nghiên cứu.

Vật liệu và phương pháp nghiên cứu

Quy trình lấy mẫu bụi $PM_{2.5}$

Khu vực nghiên cứu được bố trí tại Học viện Nông nghiệp Việt Nam nằm ở khu vực ngoại thành thành phố Hà Nội (Kinh độ: 21,0085; Vĩ độ: 105,8436) (Hình 1). Mẫu $PM_{2.5}$ được thu theo chu kỳ 24 giờ bằng thiết bị lấy mẫu lưu lượng lớn TE-1000DBLX (Tisch Environment, Inc.) với lưu lượng 200 L/phút, sử dụng giấy lọc thạch anh đường kính 102 mm, từ 06:00 sáng đến 6:00 sáng ngày hôm sau trong đó thời gian thay mẫu là 30 phút. Thiết bị lấy mẫu được đặt ở độ cao khoảng 15 m so với mặt đất và cách tuyến giao thông gần nhất khoảng 100 m nhằm hạn chế ảnh hưởng trực tiếp của phát thải cục bộ. Sau khi lấy mẫu, giấy lọc được thu hồi, bảo quản trong điều kiện kín khí và ở nhiệt độ $\sim 4^{\circ}C$ nhằm hạn chế các biến đổi vật lý - hóa học.



Hình 1. Vị trí lấy mẫu bụi $PM_{2.5}$

Quá trình lấy mẫu diễn ra trong hai đợt: mùa mưa từ ngày 04 - 14/4/2025 và mùa khô từ ngày 09 - 19/12/2025. Toàn bộ mẫu sau đó được chuyển đến Phòng phân tích dioxin, Phân viện Hóa - Môi trường (nay là Phòng Quan trắc và Phân tích Dioxin, Viện Hoá học và Môi trường Nhiệt đới), Trung tâm Nhiệt đới Việt - Nga để tiến hành xác định nồng độ khối lượng $PM_{2.5}$.

Phương pháp phân tích SEM

Hình thái học và sự phân bố kích thước của các hạt bụi $PM_{2.5}$ được đánh giá thông qua kỹ thuật kính hiển vi điện tử quét (SEM). Việc phân tích được tiến hành trên hệ kính hiển vi điện tử quét phát xạ trường FE - SEM (S-4800, Hitachi, Tokyo, Nhật Bản). Kỹ thuật SEM cho phép quan sát chi tiết cấu trúc bề mặt và hình dạng

hạt bằng cách sử dụng chùm điện tử hội tụ quét trực tiếp lên mẫu với độ phân giải cao. Đối với mỗi mẫu, nhiều ảnh SEM được chụp tại các trường ảnh độc lập nhằm đảm bảo tính đại diện của mẫu. Các hạt thu được trên ảnh SEM sau đó được xử lý bằng phần mềm ImageJ để xác định phân bố kích thước hạt, đặc điểm hình thái của các hạt PM_{2.5} trong không khí xung quanh. Sự phối hợp giữa SEM và ImageJ hiện được sử dụng phổ biến trong nghiên cứu aerosol khí quyển và đã được xác nhận về độ tin cậy khoa học (Linh và cộng sự, 2023).

Mô hình HYSPLIT

Nhằm xác định các nguồn phát thải chủ yếu đóng góp vào nồng độ hạt mịn tại khu vực Thành phố Hà Nội, phân tích quỹ đạo ngược của khối khí đã được thực hiện tại điểm tiếp nhận bằng mô hình NOAA - HYSPLIT, triển khai trong môi trường R thông qua gói SplitR. Mô hình sử dụng bộ dữ liệu khí tượng GDAS (Global Data Assimilation System) do NOAA cung cấp, với độ phân giải không gian $1^\circ \times 1^\circ$ và độ phân giải thời gian 6 giờ. Đây là bộ dữ liệu đồng hóa khí tượng toàn cầu được sử dụng rộng rãi trong các nghiên cứu truy vết quỹ đạo không khí và đánh giá sự lan truyền chất ô nhiễm trong khí quyển. Các quỹ đạo ngược 72 giờ được tính toán tại độ cao 100 m so với mặt đất nhằm phản ánh đặc trưng di chuyển của các khối khí ảnh hưởng đến khu vực nghiên cứu. Để đánh giá các khu vực nguồn tiềm năng ảnh hưởng đến nồng độ hạt mịn quan trắc được, phương pháp quỹ đạo có trọng số nồng độ (Concentration Weighted Trajectory - CWT) đã được áp dụng và tính toán như trong công thức (1):

$$\ln(C_{ij}) = \frac{1}{\sum_{k=1}^n \tau_{ijk}} \ln(C_k) \tau_{ij} \quad (1)$$

Trong đó, giá trị CWT thể hiện nồng độ trung bình logarit của chất ô nhiễm gắn với từng ô lưới không gian. Cụ thể, với i và j là chỉ số của ô lưới, k là chỉ số quỹ đạo, n là tổng số quỹ đạo, C_k là nồng độ PM_{2.5} đo được tại thời điểm quỹ đạo k đến điểm tiếp nhận, và τ_{ijk} là thời gian lưu trú của quỹ đạo k trong ô lưới (i, j). Giá trị C_{ij} càng lớn cho thấy khu vực tương

ứng có khả năng đóng góp cao hơn vào nồng độ PM_{2.5} tại điểm nghiên cứu khi các khối không khí đi qua. Phân tích CWT được thực hiện bằng gói Openair trong phần mềm R.

Kết quả

Kết quả quan trắc nồng độ bụi mịn PM_{2.5} được tổng hợp trong Bảng 1 cho thấy sự khác biệt rõ rệt giữa hai mùa, trong đó nồng độ trong mùa khô cao hơn đáng kể so với mùa mưa. Đây là đặc điểm đã được ghi nhận phổ biến trong diễn biến chất lượng không khí tại Hà Nội trong nhiều năm gần đây. Giá trị trung bình PM_{2.5} đo được trong mùa mưa và mùa khô lần lượt là $46,41 \pm 20,02 \mu\text{g}/\text{m}^3$ và $104,68 \pm 64,83 \mu\text{g}/\text{m}^3$. So sánh với ngưỡng khuyến cáo trung bình ngày của Tổ chức Y tế Thế giới (WHO, $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$) cho thấy toàn bộ các ngày lấy mẫu đều vượt quá giá trị này (WHO, n.d.). Khi đối chiếu với Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng không khí xung quanh (QCVN 05:2023/BTNMT), phần lớn các ngày quan trắc trong mùa khô có nồng độ PM_{2.5} cao hơn giới hạn cho phép ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Ngoại trừ ngày lấy mẫu thứ 5 ghi nhận giá trị $21,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ thấp hơn quy chuẩn thì các ngày còn lại đều vượt chuẩn. Theo nhật ký quan trắc, ngày này (13/12/2025) có mưa, dẫn đến sự suy giảm mạnh nồng độ PM_{2.5}, thấp hơn khoảng 10 lần so với ngày liền trước. Ngược lại, trong mùa mưa chỉ có bốn ngày lấy mẫu ghi nhận nồng độ PM_{2.5} vượt quá giới hạn của QCVN 05:2023/BTNMT. Xu thế biến thiên theo mùa của nồng độ bụi mịn PM_{2.5} tại khu vực Thành phố Hà Nội, cũng như tại các đô thị thuộc vùng khí hậu nhiệt đới, cho thấy sự tương đồng rõ rệt với các kết quả đã được công bố trong các nghiên cứu trước đây của Huy và cộng sự (2018), Thuy (2023) và Ma và cộng sự (2019). Cụ thể, nồng độ PM_{2.5} trong mùa mưa thường thấp hơn so với mùa khô, điều này có thể được giải thích bởi độ ẩm khí quyển cao hơn và sự gia tăng của quá trình lắng đọng ướt, qua đó làm tăng hiệu quả loại bỏ các hạt bụi mịn khỏi khí quyển (Hien và cộng sự, 2022a; Linh và cộng sự, 2023).

Bảng 1. Nồng độ bụi mịn PM_{2.5} trên các mẫu đã thu được (Đơn vị: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

	Mùa mưa	Mùa khô
Ngày 1	18,77	104,68
Ngày 2	21,27	124,00
Ngày 3	84,23	217,08
Ngày 4	55,00	212,68
Ngày 5	67,62	21,80
Ngày 6	50,42	50,56
Ngày 7	49,73	71,04
Ngày 8	34,38	93,52
Ngày 9	37,31	61,24
Ngày 10	45,35	90,20
Giá trị trung bình	46,41 $\pm$ 20,02	104,68 $\pm$ 64,83

Thảo luận

Phân bố, hình thái và kích thước hạt

Hình 2 (a - d) thể hiện ảnh SEM của bụi PM_{2.5} thu được tại khu vực nghiên cứu, trong đó Hình 2a và 2b đại diện cho mùa khô (DS), còn Hình 2c và 2d đại diện cho mùa mưa (RS). Các hạt vật chất phân bố tương đối đồng đều trên bề mặt giấy lọc và xen kẽ với cấu trúc sợi của giấy lọc (Hình 2a và 2c). Ở độ phóng đại cao hơn (Hình 2b và 2d), các hạt mịn có kích thước khí động học nhỏ hơn 1,0 μm chiếm ưu thế, phù hợp với kết quả phân bố kích thước hạt được xác định bằng phần mềm ImageJ như thể hiện trong Hình 2f.

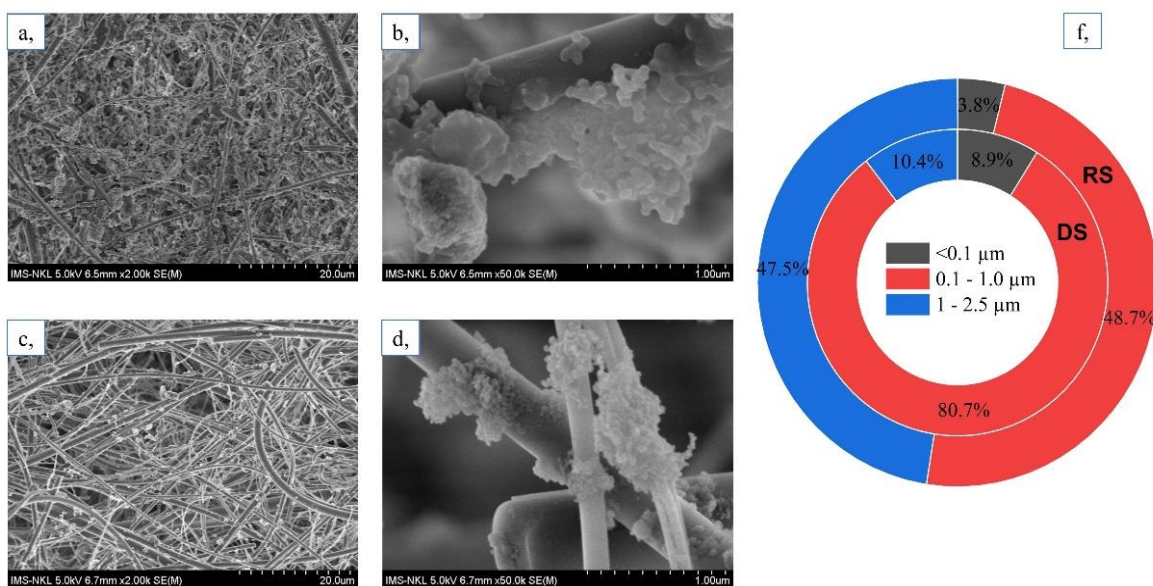
Trong mùa khô, phân đoạn hạt 0,1 - 1,0 μm chiếm tỷ lệ cao nhất trong tổng số PM_{2.5} (chiếm 80,7%) tiếp đến là các hạt trong khoảng từ 1-2,5 μm (chiếm 10,4%) và cuối cùng là các hạt siêu mịn có đường kính < 0,1 μm (chiếm 8,9%). Cấu trúc phân bố này phản ánh sự chi phối rõ rệt của các hạt mịn kích thước nhỏ, vốn là khoảng kích thước đặc trưng của aerosol phát sinh trực tiếp từ các quá trình đốt cháy không hoàn toàn và các hạt đã trải qua quá trình kết tụ và tăng trưởng trong điều kiện khí quyển ổn định, lượng mưa thấp và khả năng khuếch tán kém (Bessagnet và cộng sự, 2022; Mansurov, 2005). Kết quả này phù hợp chặt chẽ với phân tích hình thái bằng SEM, trong đó các hạt có hình dạng bất định, kết tụ dạng chuỗi và cụm xuất hiện phổ biến trong mùa khô. Các nghiên cứu SEM - EDS trước đây cho thấy các hạt dạng cụm

thường tồn tại dưới dạng các tập hợp gồm nhiều hạt sơ cấp có kích thước Nano (< 0,1 μm) và các hạt có kích thước 0,1 - 1,0 μm là chủ yếu. Kết quả nghiên cứu cũng tương đồng với các quan sát tại Bắc Kinh, nơi ghi nhận kiểu hình thái và phân bố kích thước đặc trưng của các hạt aerosol phát sinh từ hoạt động giao thông cùng quá trình đốt cháy không hoàn toàn nhiên liệu hóa thạch và sinh khối (Shi và cộng sự, 2015). Do đó, tỷ lệ phần trăm cao nhất ở các hạt có đường kính từ 0,1 - 1,0 μm trong mùa khô có thể gợi ý sự đóng góp đáng kể của các nguồn phát thải sơ cấp tại khu vực nghiên cứu, bao gồm hoạt động giao thông, đốt sinh khối và các hoạt động dân sinh. Tuy nhiên, việc xác định chính xác nguồn phát thải cần được hỗ trợ thêm bằng các phân tích thành phần hóa học và chỉ thị nguồn chuyên sâu đối với PM_{2.5} tại khu vực nghiên cứu.

Trong mùa mưa, kết quả phân bố kích thước (Hình 2f) mặc dù kích thước các hạt vẫn chủ yếu là các hạt có kích thước từ 0,1 - 1,0 μm (chiếm 48,7%), và có thể thấy tỷ lệ các hạt < 0,1 μm (chiếm 3,8%) giảm rõ rệt so với mùa khô. Sự suy giảm rõ rệt của các hạt có kích thước nhỏ hơn cho thấy vai trò chi phối của quá trình lắng đọng ướt vào mùa mưa. Dưới điều kiện lượng mưa lớn và độ ẩm cao, các hạt siêu mịn dễ bị loại bỏ khỏi khí quyển, dẫn đến sự suy giảm đáng kể tỷ lệ này trong tổng PM_{2.5}. Cơ chế loại bỏ phụ thuộc kích thước hạt này đã được ghi nhận nhất quán trong nhiều nghiên cứu quan trắc và mô phỏng khí quyển, khẳng định mưa là

một trong những con đường chính làm giảm nồng độ aerosol kích thước nhỏ trong khí quyển (Andronache và cộng sự, 2006). Các nghiên cứu gần đây về mối liên hệ giữa điều kiện khí tượng trong mùa mưa và quá trình rửa trôi các hạt mịn và siêu mịn đã chỉ ra rằng, trong môi trường đô thị và cận đô thị, mưa đóng vai trò là một trong những cơ chế loại bỏ sol khí kích thước nhỏ quan trọng nhất. Kết quả này cũng phù hợp với các nghiên cứu của Niu và cộng sự (2023) và de Blanco-Alegre và cộng sự (2021), khẳng định vai trò quyết định của quá trình lắng đọng ướt trong việc loại bỏ các hạt siêu mịn và các hạt có cấu trúc phân nhánh phức tạp khỏi khí quyển tại các khu vực có cường độ mưa lớn. Qua đó, cho thấy tỷ lệ thấp của các hạt siêu mịn quan trắc được trong mùa mưa tại khu vực nghiên cứu là

hoàn toàn phù hợp với xu thế theo mùa. Nhìn chung, trong cả hai mùa, các hạt bụi mịn có kích thước nhỏ hơn $1,0\ \mu\text{m}$ chiếm tỷ lệ đáng kể trong phân bố kích thước hạt, cho thấy chất lượng không khí tại Thành phố Hà Nội có khả năng chịu ảnh hưởng mạnh từ các nguồn phát thải ngoài phạm vi địa phương. Do các hạt có kích thước nhỏ thường có thời gian lưu trong khí quyển dài và dễ bị vận chuyển trên khoảng cách xa, làm gia tăng vai trò của quá trình vận chuyển vùng và liên vùng (Hien và cộng sự, 2022). Do đó, việc áp dụng mô hình HYSPLIT là cần thiết nhằm phân tích quỹ đạo khối khí, qua đó đánh giá mức độ đóng góp tiềm năng của các nguồn phát thải từ bên ngoài khu vực nghiên cứu đối với nồng độ $\text{PM}_{2.5}$ quan trắc được.



Hình 2. Phân bố hình thái và kích thước hạt (Trong đó: a,b, DS là mùa khô và c,d, RS là mùa mưa, f là tỷ lệ phần trăm theo khoảng kích thước hạt)

Kết quả phân tích mô hình HYSPLIT

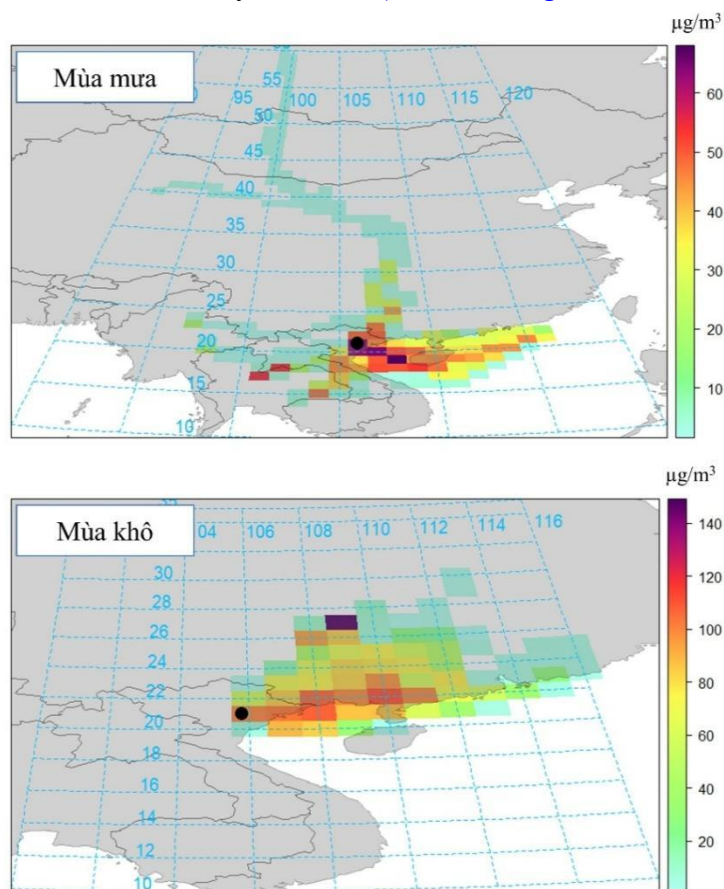
Phân tích CWT từ mô hình HYSPLIT cho hai giai đoạn đặc trưng tại thành phố Hà Nội là mùa mưa và mùa khô được minh họa trong Hình 3. Các vùng có màu đỏ đậm tương ứng với các nguồn đóng góp chính liên quan đến nồng độ $\text{PM}_{2.5}$ có giá trị cao nhất và tiềm năng nhất, lần lượt có nồng độ là $84,24\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ và $217,08\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ tương ứng với mùa mưa và mùa khô.

Trong mùa khô, dưới tác động bị chi phối rõ rệt của gió mùa Đông Bắc, các khối khí tập trung chủ yếu trên các vùng đất liền từ hướng Bắc và

Đông Bắc di chuyển với tốc độ thấp qua các vùng nguồn phát thải công nghiệp trọng điểm ở phía Nam Trung Quốc và các nhà máy nhiệt điện than dọc hành lang kinh tế Đông Bắc Việt Nam. Do hành trình di chuyển dài trên đất liền, các khối khí này liên tục tích tụ bụi và các tiền chất ô nhiễm trước khi tiếp cận điểm thu nhận, dẫn đến nồng độ CWT nền rất cao ($> 200\ \mu\text{g}/\text{m}^3$). Cơ chế vận chuyển tầm xa từ các nguồn phía Bắc này đã được chứng minh là nguyên nhân chính gây ra các đợt ô nhiễm cấp tính tại Hà Nội trong các nghiên cứu trước đây (Cohen và cộng sự, 2010; Hai & Oanh, 2013).

Ngược lại, trong mùa mưa, sự thay thế của gió mùa Đông Bắc bằng gió mùa Tây Nam và Đông Nam đã làm thay đổi hoàn toàn bản chất khí động học của ô nhiễm. Các quỹ đạo khí trong giai đoạn này chủ yếu là khối khí biển xuất phát từ Biển Đông. Đặc trưng của các khối khí này là độ sạch cao, độ ẩm lớn và hành trình di chuyển chủ yếu trên mặt biển, giúp hạn chế tối đa việc tiếp nhận các chất ô nhiễm từ nguồn nhân tạo (Hai & Oanh, 2013). Khi các khối khí này đi vào

đất liền, chúng hoạt động như dòng khí pha loãng (dilution flow) và kết hợp với lượng mưa lớn làm tăng quá trình lắng đọng ướt, giúp rửa trôi các hạt mịn khỏi cột khí quyển, từ đó làm giảm đáng kể nồng độ $PM_{2.5}$ và dẫn tới giá trị CWT mùa mưa thấp hơn nhiều lần so với mùa khô ($\leq 60 \mu g/m^3$), một xu hướng đã được báo cáo trong nhiều phân tích khí tượng vận chuyển $PM_{2.5}$ cho khu vực Hà Nội và Đông Nam Á (Hien và cộng sự, 2001, 2002).



Hình 3. Phân bố trọng số nồng độ CWT của bụi $PM_{2.5}$ vào mùa mưa và mùa khô

Kết luận

Nghiên cứu là cơ sở dữ liệu về đặc tính vật lý của bụi và cơ chế ô nhiễm bụi mịn $PM_{2.5}$ tại khu vực ngoại thành Hà Nội, với kết quả quan trắc cho thấy mức độ ô nhiễm mùa khô ở mức báo động (trung bình $104,68 \pm 64,83 \mu g/m^3$), cao gấp hơn 2,2 lần so với mùa mưa ($46,41 \pm 20,02 \mu g/m^3$) và thường xuyên vượt ngưỡng QCVN 05:2023/BTNMT. Điểm mới nổi bật của nghiên cứu là việc chứng minh mối liên kết chặt chẽ giữa đặc điểm hình thái vi mô và động lực học khí quyển: phân tích SEM đã chỉ ra sự chiếm ưu thế tuyệt đối (80,7%) các hạt có kích thước 0,1 - 1,0 μm trong mùa khô chỉ dấu đặc trưng

của các nguồn đốt cháy sơ cấp và hình thái của chúng tập trung dưới dạng chuỗi và cụm thường được ghi nhận trong các aerosol liên quan đến quá trình đốt cháy sơ cấp. Trong khi mô hình HYSPLIT cho thấy sự tích lũy và phát thải tầm xa từ các khối khí lục địa di chuyển đường dài từ phía Bắc. Ngược lại, chất lượng không khí mùa mưa được cải thiện rõ rệt nhờ cơ chế tác động kép các khối không khí sạch từ biển và hiệu quả rửa trôi sự tích lũy của cơ chế lắng đọng ướt đối với các hạt siêu mịn ($< 0,1 \mu m$) trong khí quyển. Kết quả nghiên cứu nhấn mạnh vai trò quan trọng của điều kiện khí tượng và vận chuyển liên vùng trong sự biến động theo

mùa của ô nhiễm PM_{2.5} tại Hà Nội. Tuy nhiên, nghiên cứu hiện tại chưa kết hợp các phân tích thành phần hóa học chuyên sâu, do đó việc xác định chính xác nguồn phát thải PM_{2.5} vẫn cần được tiếp tục làm rõ trong các nghiên cứu tiếp theo.

Thông tin tài trợ: Nghiên cứu này được thực hiện với sự hỗ trợ kinh phí từ Trung tâm Nhiệt đới Việt - Nga trong khuôn khổ Nhiệm vụ Khoa học và công nghệ cấp Trung tâm. Mã số: MT.Đ1.19/24.

Tuyên bố về đóng góp của tác giả: Bùi Duy Linh: Đề xuất ý tưởng nghiên cứu, xây dựng phương pháp nghiên cứu, thực hiện lấy mẫu và phân tích, xử lý và phân tích số liệu, diễn giải kết quả, soạn thảo bản thảo và chỉnh sửa bản thảo; Nguyễn Đức Thắng: Thực hiện lấy mẫu và phân tích, xử lý và phân tích số liệu; Hoàng Anh Lê: Đề xuất ý tưởng nghiên cứu, xây dựng phương pháp nghiên cứu, diễn giải kết quả, soạn thảo bản thảo và chỉnh sửa bản thảo; Nguyễn Thị Năng: Xử lý và phân tích số liệu.

Tuyên bố về khả năng truy cập dữ liệu: Dữ liệu hỗ trợ cho các kết quả của nghiên cứu này có thể được cung cấp bởi tác giả liên hệ theo yêu cầu hợp lý.

Tuyên bố về sử dụng Gen AI: Các công cụ AI tạo sinh không được sử dụng để tạo ra hoặc chỉnh sửa nội dung khoa học của bản thảo này. Trong phần có sử dụng công cụ AI (chỉ hỗ trợ kiểm tra ngữ pháp/định dạng), các tác giả đã kiểm tra toàn bộ nội dung và hoàn toàn chịu trách nhiệm đối với nội dung cuối cùng.

Tuyên bố xung đột lợi ích: Các tác giả khẳng định không có bất kỳ xung đột lợi ích nào liên quan đến nghiên cứu, tài trợ, hoặc xuất bản bài báo này.

Tài liệu tham khảo

- Andronache, C., Grönholm, T., Laakso, L., Phillips, V., & Venäläinen, A. (2006). Scavenging of ultrafine particles by rainfall at a boreal site: Observations and model estimations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6(12), 4739–4754. <https://doi.org/10.5194/acp-6-4739-2006>
- Arhami, M., Minguillón, M. C., Polidori, A., Schauer, J. J., Delfino, R. J., & Sioutas, C. (2010). Organic compound characterization and source apportionment of indoor and outdoor quasi-ultrafine particulate matter in retirement homes of the Los Angeles Basin. *Indoor Air*, 20(1), 17–30. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2009.00620.x>
- Bessagnet, B., Allemand, N., Putaud, J. P., Couvidat, F., André, J. M., Simpson, D., Pisoni, E., Murphy, B. N., & Thunis, P. (2022). Emissions of carbonaceous particulate matter and ultrafine particles from vehicles - A scientific review in a cross-cutting context of air pollution and climate change. *Applied Sciences (Basel, Switzerland)*, 12(7), 1–52. <https://doi.org/10.3390/app12073623>
- Bui, D. L., Hoang, A. L., Nghiem, X. T., Nguyen, V. T., Nguyen, T. N., & Nguyen, N. H. (2022). Evaluation

of mass concentration and size distribution of fine particles (PM_{2.5}) in Bien Hoa City, Dong Nai Province. *VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences*, 38(3). <https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.4862>

- Cohen, D. D., Crawford, J., Stelcer, E., & Bac, V. T. (2010). Long range transport of fine particle windblown soils and coal fired power station emissions into Hanoi between 2001 to 2008. *Atmospheric Environment*, 44(31), 3761–3769. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.06.047>
- Dat, N.Q., Ly, B.T., Nghiem, T.D., Nguyen, H.T.T., Sekiguchi, K., Huyen, T.T., Vinh, T.H., Tien, L.Q. (2024). Influence of secondary inorganic aerosol on the concentrations of PM_{2.5} and PM_{0.1} during air pollution episodes in Hanoi, Vietnam. *Aerosol Air Qual. Res.* 24, 220446. <https://doi.org/10.4209/aaqr.220446>
- de Blanco-Alegre, C., Calvo, A., Castro, A., Oduber, F., Alonso-Blanco, E., & Fraile, R. (2021). Scavenging of submicron aerosol particles in a suburban atmosphere: The raindrop size factor. *Environmental Pollution*, 285, Article 117371. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117371>
- Engel-Cox, J., Oanh, N. T. K., van Donkelaar, A., Martin, R. V., & Zell, E. (2013). Toward the next generation of air quality monitoring: Particulate matter. *Atmospheric Environment*, 80, 584–590. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.08.016>
- Hai, C. D., & Oanh, N. T. K. (2013). Effects of local, regional meteorology and emission sources on mass and compositions of particulate matter in Hanoi. *Atmospheric Environment*, 78, 105–112. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.05.006>
- Hien, P., Binh, N., Truong, Y., Ngo, N., & Sieu, L. (2001). Comparative receptor modelling study of TSP, PM₂, and PM_{2–10} in Ho Chi Minh City. *Atmospheric Environment*, 35(15), 2669–2678. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(00\)00574-4](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(00)00574-4)
- Hien, P., Bac, V., Tham, H., Nhan, D., & Vinh, L. (2002). Influence of meteorological conditions on PM_{2.5} and PM_{2.5–10} concentrations during the monsoon season in Hanoi, Vietnam. *Atmospheric Environment*, 36(21), 3473–3484.23. <https://doi.org/10.15625/2525-2518/16497>
- Hien, T. T., Chi, N. D. T., Huy, D. H., Le, H. A., Oram, D. E., Forster, G. L., Mills, G. P., & Baker, A. R. (2022). Soluble trace metals associated with atmospheric fine particulate matter in the two most populous cities in Vietnam. *Atmospheric Environment: X*, 15, Article 100178. <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2022.100178>
- Hien, T. T., Huy, D. H., Dominutti, P. A., Chi, N. D. T., Hopkins, J. R., Shaw, M., Forster, G., Mills, G., Le, H. A., & Oram, D. (2022). Comprehensive volatile organic compound measurements and their implications for ground-level ozone formation in the two main urban

- areas of Vietnam. *Atmospheric Environment*, 269, 118872. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118872>
- Huy, D. H., Nguyen, Chi, N. D. T., Phu, N. L. S., & Hien, T. H. (2018). Fine particulate matter (PM_{2.5}) in Ho Chi Minh City: Analysis of the status and the temporal variation based on the continuous data from 2013–2017. *Journal of Natural Sciences*, 2(5), 130–137. <https://doi.org/10.32508/stdjns.v2i5.788>
- Jiang, N., Dong, Z., Xu, Y., Yu, F., Yin, S., Zhang, R. and Tang, X. (2018). Characterization of PM₁₀ and PM_{2.5} source profiles of fugitive dust in Zhengzhou, China. *Aerosol Air Qual. Res.* 18: 314-329. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2017.04.0132>
- Linh, B. D., Le, H. A., & Truong, N. X. (2023). Physico-chemical properties and transboundary transport of PM_{2.5} in Bien Hoa City, Dong Nai Province, southeastern Vietnam. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(13), 36533–36544. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24801-z>
- Ma, Y., Xin, J., Zhang, W., Liu, Z., Ma, Y., Kong, L., Wang, Y., Deng, Y., Lin, S., & He, Z. (2019). Long-term variations of the PM_{2.5} concentration identified by MODIS in the tropical rain forest, Southeast Asia. *Atmospheric Research*, 219, 140–152. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.12.024>
- Mansurov, Z. (2005). Soot formation in combustion processes: Review. *Fizika Goreniya i Vzryva*, 41, 137–156.
- Niu, G., Qi, X., Chen, L., Xue, L., Lai, S., Huang, X., Wang, J., Chi, X., Nie, W., Kerminen, V.-M., Petäjä, T., Kulmala, M., & Ding, A. (2023). The variation in the particle number size distribution during the rainfall: Wet scavenging and air mass changing. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23, 7521–7534. <https://doi.org/10.5194/acp-23-7521-2023>
- Shi, Y., Ji, Y., Sun, H., Hui, F., Hu, J., Wu, Y., Fang, J., Lin, H., Wang, J., Duan, H., & Lanza, M. (2015). Nanoscale characterization of PM_{2.5} airborne pollutants reveals high adhesiveness and aggregation capability of soot particles. *Scientific reports*, 5, 11232. <https://doi.org/10.1038/srep11232>
- Thuy, P. C. (2023). Evaluation of variation and influence of selected meteorological factors on PM_{2.5} concentrations in a suburban site of Hanoi. *TNU Journal of Science and Technology*, 228(10), 262–270.
- United States Environmental Protection Agency. (2020). *Our nation's air: Status and trends through 2020*. United States Environmental Protection Agency
- World Health Organization (WHO). (2025). *Air pollution kills 7 million every year*. IQAir. <https://www.iqair.com/newsroom/air-pollution-kills-7-million-every-year>
- World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>

Abstract

Morphological Analysis, Particle Size Classification, and Long - Range Transport Emissions of Fine Particulate Matter in the Ambient Air Environment of Suburban Hanoi

This study investigated the seasonal variation, morphological characteristics, and transport pathways of PM_{2.5} at a monitoring site located in the suburban area of Hanoi during the dry and rainy seasons of 2025. PM_{2.5} samples were collected using a high-volume air sampler (Tisch Environment, Inc.), followed by particle morphology characterization using scanning electron microscopy (SEM) and assessment of air mass transport pathways using the Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) model. The monitoring results showed that the average PM_{2.5} concentration during the dry season reached $104.68 \pm 64.83 \mu\text{g}/\text{m}^3$, significantly exceeding the limit specified in QCVN 05:2023/BTNMT, whereas lower concentrations were observed during the rainy season ($46.41 \pm 20.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Morphological analysis revealed that particles with sizes ranging from 0.1 to 1.0 μm accounted for the highest proportion (80.7%) during the dry season and predominantly existed as chain-like and clustered aggregates, which are commonly associated with combustion-related emissions. In contrast, the rainy season highlighted the important role of wet deposition in removing ultrafine particles ($< 0.1 \mu\text{m}$) from the atmosphere. HYSPLIT results further indicated that dry - season pollution was strongly influenced by the accumulation and long-range transport of continental air masses originating from northern regions, whereas the Southwest/Southeast monsoon transported cleaner marine air masses that contributed to the dilution of air pollution during the rainy season. This study provides experimental scientific evidence of the close relationship between meteorological conditions, particle microstructure, and urban air pollution levels.

Keywords:

HYSPLIT; Particle morphology; PM_{2.5}; SEM.