

ĐÁNH GIÁ THỬ NGHIỆM THIẾT BỊ CẢM BIẾN CHI PHÍ THẤP (LCS) ĐỂ QUAN TRẮC Ô NHIỄM BỤI $PM_{2.5}$ TRONG ĐIỀU KIỆN MÔI TRƯỜNG CỦA THÀNH PHỐ HÀ NỘI

⁽¹⁾Doãn Hà Phong, ^(1*)Ngô Thị Vân Anh, ⁽¹⁾Lê Ngọc Cầu, ⁽¹⁾Lê Văn Quy, ⁽¹⁾Trần Việt Tùng,
⁽¹⁾Phạm Thị Quỳnh, ⁽¹⁾Vũ Xuân Hùng, ⁽²⁾Hồ Minh Tráng, ⁽²⁾Nguyễn Công Huy,
⁽²⁾Vương Như Luận, ⁽²⁾Đỗ Trường Thọ
⁽¹⁾Viện Khoa học Khí tượng thủy văn, Môi trường và Biển
⁽²⁾Trung tâm Quan trắc môi trường miền Bắc

Ngày nhận bài: 1/12/2025; ngày chuyển phản biện: 2/12/2025; ngày chấp nhận đăng: 6/2/2026

Tóm tắt: Thiết bị cảm biến chi phí thấp (LCS) ngày càng được sử dụng rộng rãi trong quan trắc chất lượng môi trường không khí, tuy nhiên, độ chính xác và độ ổn định của thiết bị LCS là vấn đề cần được đánh giá, đặc biệt trong các điều kiện khí hậu, thời tiết khác nhau. Nghiên cứu này thử nghiệm 5 thiết bị LCS (GBiot-FH0) quan trắc bụi $PM_{2.5}$ trong vòng 1 năm (7/2024 - 6/2025) trong điều kiện của Thành phố (TP) Hà Nội. Kết quả kiểm tra song song cho thấy tương quan giữa 5 LCS rất cao ($R^2 = 0,97-0,98$) và sai số nhỏ ($RMSE = 0,68-3,21 \mu g/m^3$). Kết quả chuẩn hóa số liệu đo của 5 LCS theo số liệu đo của 3 trạm chuẩn (FEM) của Trung tâm quan trắc môi trường miền Bắc (NCEM) chỉ ra rằng 5 LCS có độ tương quan khá tốt ($R^2 = 0,59-0,74$) với các trạm FEM- NCEM; độ nhạy của LCS đặt gần trạm FEM-Bách Khoa đạt cao nhất (slope = 0,92). Trong giai đoạn quan trắc, 5 LCS được lắp đặt tại 5 điểm phân bố rải rác trên địa bàn TP. Hà Nội. Số liệu quan trắc của 5 LCS trong vòng 1 năm (7/2024-6/2025) sau khi chuẩn hóa theo trạm chuẩn (FEM- NCEM) được sử dụng để đánh giá ô nhiễm bụi $PM_{2.5}$ tại TP. Hà Nội. Kết quả quan trắc của 5 LCS đều ghi nhận được các đợt ô nhiễm $PM_{2.5}$ tại TP. Hà Nội trong thời gian nghiên cứu (đặc biệt vào mùa đông- xuân) và biến trình ngày đều tương đồng với kết quả quan trắc của FEM- NCEM (tương quan Pearson (r) = 0,82-0,85). Như vậy, thiết bị LCS (GBiot-FH0) này có thể được ứng dụng trong quan trắc bụi $PM_{2.5}$ trong điều kiện khí hậu, thời tiết của TP. Hà Nội, tuy nhiên cần thực hiện bước kiểm tra hoạt động của thiết bị, chuẩn hóa số liệu định kỳ. Việc đánh giá, hiệu chuẩn, chuẩn hóa thiết bị LCS sẽ mở rộng tiềm năng ứng dụng phát triển mạng lưới quan trắc chất lượng không khí, đặc biệt tại những nơi nguồn lực còn hạn chế.

Từ khóa: LCS, đánh giá vận hành, quan trắc $PM_{2.5}$, ô nhiễm không khí, TP. Hà Nội.

1. Đặt vấn đề

Bụi mịn (PM) được xem là một trong những nguồn ô nhiễm phổ biến nhất trong môi trường đô thị và đồng thời cũng là tác nhân có mức độ ảnh hưởng nghiêm trọng nhất đối với sức khỏe cộng đồng. Hiện nay, bụi mịn được đánh giá là yếu tố môi trường dẫn đến tỷ lệ tử vong sớm cao nhất [1], [2]. Ước tính trên toàn thế giới mỗi năm có khoảng 6,7 triệu trường hợp tử vong sớm liên quan đến phơi nhiễm bụi $PM_{2.5}$ và ozone (O_3) [1]. Dù nồng độ $PM_{2.5}$ biến thiên

theo từng khu vực và thời gian trong năm, phần lớn dân số toàn cầu (khoảng 91%) vẫn đang sống trong môi trường có mức $PM_{2.5}$ vượt ngưỡng khuyến cáo của Tổ chức Y tế Thế giới [2].

Tại Việt Nam, Chính phủ đã ban hành Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng không khí (QCVN 05:2023), quy định giới hạn nồng độ các chất ô nhiễm và phương pháp đo đối với bụi PM_{10} và $PM_{2.5}$ [3]. Nhằm theo dõi các thông số quan trọng về sức khỏe, nồng độ PM đang được quan trắc thông qua mạng lưới trạm quốc gia do Cục Môi trường và các trạm cấp tỉnh do Sở Nông nghiệp và Môi trường (NN&MT) quản lý. Những trạm này sử dụng hệ thống thiết bị đạt chuẩn

Tác giả liên hệ: Ngô Thị Vân Anh
Email: vananhmd@gmail.com

(FRM/FEM) như máy đo hấp thụ beta (BAM), vi cân dao động TEOM, hay hệ thống lấy mẫu - cân trọng lượng [4].

Do đặc thù là các thiết bị tiêu chuẩn có kích thước lớn, chi phí đầu tư cao (thường trên 20.000 USD), cần nguồn điện ổn định và yêu cầu bảo trì, hiệu chuẩn định kỳ bởi nhân sự chuyên môn, việc mở rộng mạng lưới trạm quan trắc tự động, liên tục tại Việt Nam vẫn gặp nhiều hạn chế và số lượng trạm đến nay còn khá khiêm tốn [4].

Những năm gần đây, bên cạnh hệ thống trạm chuẩn quốc gia (FEM), các thiết bị cảm biến chi phí thấp (LCS) được triển khai ở nhiều nơi nhằm cung cấp dữ liệu chất lượng không khí với độ phủ không gian và thời gian chi tiết hơn. Riêng tại Hà Nội đã có 3 trạm quan trắc tiêu chuẩn (FEM) và hơn 30 điểm sử dụng LCS do Sở Tài nguyên và Môi trường (TN&MT) trước đây (nay là Sở NN&MT) quản lý [5].

Các cảm biến chi phí thấp (LCS) có ưu thế về chi phí, thường từ vài trăm đến vài nghìn USD, dễ lắp đặt và yêu cầu hạ tầng tối thiểu [6], [7]. Nhờ vậy, chúng được triển khai rộng rãi trong cộng đồng và trở thành nguồn dữ liệu bổ trợ cho hệ thống quan trắc chính thức, giúp tăng mật độ điểm đo bụi PM trong khu vực đô thị [8-10]. Tuy nhiên, để dữ liệu LCS có độ tin cậy cao, việc đánh giá và kiểm soát chất lượng đo đặc vẫn là yêu cầu then chốt.

Việc hiệu chuẩn, chuẩn hóa số liệu đo của cảm biến chi phí thấp LCS theo thiết bị chuẩn FEM là bắt buộc và thường phải được thực hiện ngoài hiện trường [7], [11], [12]. Dù trong phòng thí nghiệm, LCS có thể đạt tương quan

cao với thiết bị chuẩn ($R^2 > 0,85$), nhưng khi đặt trong điều kiện môi trường thực tế, hiệu suất của chúng thường dao động mạnh với R^2 chỉ từ 0,36 đến 0,92 [13-17]. Nguyên nhân chính đến từ sự thay đổi về điều kiện khí tượng như nhiệt độ, độ ẩm, cùng với sự khác biệt về nguồn phát thải và đặc tính vật lý - hóa học của hạt bụi [11].

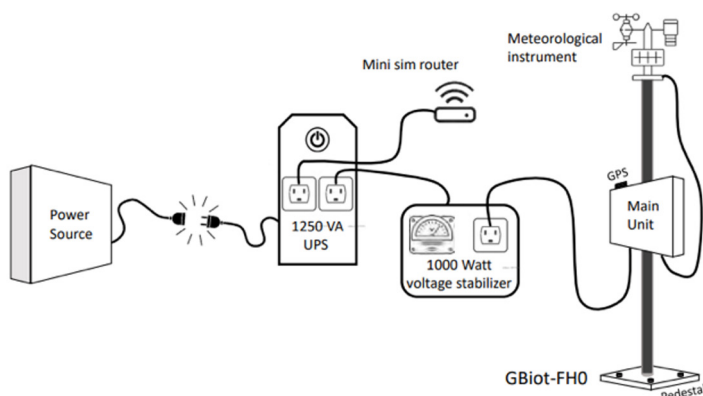
Tuy LCS đã được nghiên cứu ở nhiều quốc gia, các nghiên cứu thực nghiệm về hiệu suất LCS đo $PM_{2.5}$ trong điều kiện thực địa tại Việt Nam vẫn còn hạn chế. Với khí hậu nóng ẩm đặc trưng, nhiệt độ mùa hè phổ biến từ 25-35°C, độ ẩm khoảng 80% [18], cùng mức độ ô nhiễm bụi đáng báo động ở các đô thị lớn do giao thông và công nghiệp [19], [20], việc đánh giá hoạt động của LCS trong điều kiện môi trường Việt Nam là vô cùng cần thiết để phục vụ chuẩn hóa và ứng dụng dữ liệu chính xác hơn.

Bài báo này được thực hiện nhằm làm rõ hơn hiệu quả đo nồng độ $PM_{2.5}$ của thiết bị LCS, đánh giá mức độ chính xác và độ ổn định của LCS khi vận hành dưới điều kiện thực địa điển hình của Việt Nam. Bên cạnh đó, nghiên cứu cũng xem xét đánh giá chất lượng ô nhiễm không khí do bụi mịn $PM_{2.5}$ tại khu vực TP. Hà Nội.

2. Đối tượng và phương pháp nghiên cứu

2.1. Đối tượng nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu là hệ thống cảm biến chi phí thấp (LCS), cụ thể là các cảm biến đo bụi $PM_{2.5}$, được triển khai ngoài thực địa trên địa bàn TP. Hà Nội để đánh giá hiệu quả đo, kiểm tra mức độ chính xác và độ ổn định khi hoạt động trong điều kiện khí hậu mùa hè nóng ẩm và mùa đông khô lạnh của TP. Hà Nội.



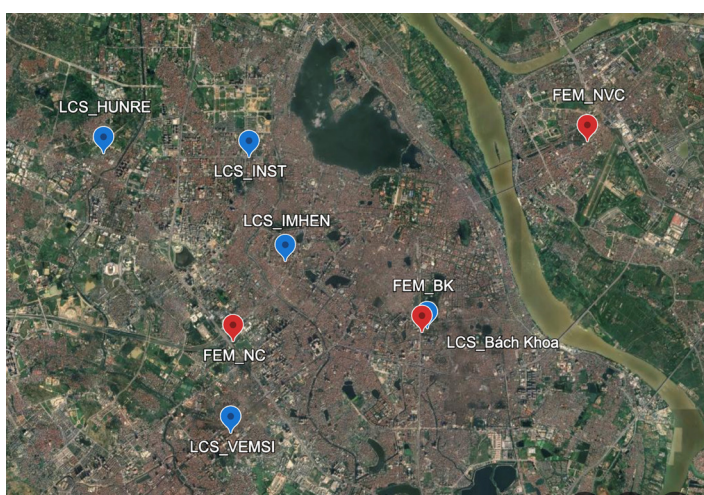
Hình 1. Sơ đồ hệ thống thiết bị LCS quan trắc chất lượng không khí

Loại thiết bị LCS trong nghiên cứu này mang nhãn hiệu GBiot-FH0 do công ty Green Blue Corp sản xuất tại Nhật Bản. Lưu ý rằng LCS (Gbiot-FH0) được trang bị kèm theo thiết bị đo khí tượng (Hình 1). Ngoài ra, hệ thống thiết bị LCS này còn được trang bị bộ định tuyến kết nối wifi để truyền số liệu thời gian thực (realtime) trực tuyến về máy chủ. Để đề phòng trường hợp bị mất điện, hệ thống quan trắc LCS được trang bị thêm UPS.

Bên cạnh đó, dựa trên số liệu quan trắc $PM_{2.5}$ thu thập được từ các trạm LCS và sau khi được chuẩn hóa, bài báo cũng đánh giá ô nhiễm bụi $PM_{2.5}$ tại TP. Hà Nội bao gồm đặc điểm biến

động theo không gian và thời gian, mức ô nhiễm so với quy chuẩn.

Phạm vi nghiên cứu: Đánh giá, chuẩn hóa số liệu đo của 5 LCS (Gbiot-FH0) theo các trạm chuẩn (FEM) của NCEM. Sau đó, sử dụng 5 thiết bị LCS đã chuẩn hóa để quan trắc, đánh giá ô nhiễm $PM_{2.5}$ tại 5 điểm phân bố trên địa bàn TP. Hà Nội (Hình 2 và Bảng 1). 5 điểm lắp đặt LCS được lựa chọn theo tiêu chí phân bố không gian tương đối đều tại 5 quận nội thành, đồng thời là khu vực đông dân cư và nguồn phát thải ô nhiễm không khí lớn (giao thông, dân sinh, xây dựng...).



Hình 2. Vị trí lắp đặt các LCS và các trạm FEM của NCEM trên địa bàn TP. Hà Nội [Nguồn: Tác giả tạo lập trên Google Map]

2.2. Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu được thực hiện dựa trên phương pháp thực nghiệm ngoài thực địa kết hợp với phân tích thống kê. Cụ thể, nhóm nghiên cứu triển khai lắp đặt 5 LCS (Gbiot-FH0) và quan trắc tại 5 điểm phân bố trên địa bàn TP. Hà Nội (Bảng 1).

Nghiên cứu thiết kế 3 bước thực hiện như sau:

Bước 1: Kiểm tra song song (parallel-test) hoạt động của các LCS. Bước này tiến hành trong khoảng 7 ngày, 5 LCS được đặt tại cùng 1 vị trí để tiến hành chạy thử nhằm đánh giá chức năng hoạt động và độ tương thích, nhất quán của 5 LCS với nhau.

Bước 2: Chuẩn hóa số liệu đo LCS (correction) theo trạm chuẩn (FEM). Bước này tiến hành quan trắc thực địa (field testing) và so sánh LCS

với trạm chuẩn FEM của CEM trong khoảng 5 tháng. Mục tiêu của bước này nhằm đánh giá mức độ tương quan của LCS và FEM gần nhất và chuẩn hóa số liệu đo của các LCS theo FEM.

Bước 3: Đánh giá ô nhiễm $PM_{2.5}$ tại khu vực nghiên cứu. Số liệu quan trắc $PM_{2.5}$ bằng LCS tại 5 điểm lựa chọn trên địa bàn của TP. Hà Nội trong vòng 1 năm sau khi chuẩn hóa sẽ được sử dụng để đánh giá hiện trạng, diễn biến, đặc trưng ô nhiễm $PM_{2.5}$.

Dữ liệu nồng độ bụi $PM_{2.5}$ thu được từ các LCS được ghi nhận liên tục từng phút và truyền về máy chủ, hoặc trích xuất từ thẻ nhớ của thiết bị. Sau đó, số liệu nồng độ $PM_{2.5}$ được xử lý, chuyển đổi thành nồng độ trung bình giờ (TBh) và phân tích thống kê với dữ liệu tham chiếu của 03 trạm FEM của NCEM gồm trạm Bách Khoa

(FEM-BK), trạm Nhân Chính (FEM-NC) và trạm Nguyễn Văn Cừ (FEM-NVC) (Bảng 2) nhằm đánh giá độ chính xác (precision) thông qua độ lệch chuẩn (SD), độ lệch (bias) thông qua độ dốc (slope) và đoạn chặn (intercept) và hệ số tương quan (R^2) của thiết bị LCS. Song song với đó, nghiên cứu tiến hành phân tích thống kê chuỗi thời gian để làm rõ đặc điểm biến động theo

mùa, theo ngày của nồng độ $PM_{2.5}$ tại Hà Nội, cũng như so sánh mức độ ô nhiễm so với các quy chuẩn hiện hành (QCVN 05:2023).

Thông qua các bước đo đạc, đối sánh và phân tích, bài báo đánh giá hiệu suất đo, độ ổn định theo thời gian và khả năng ứng dụng của hệ thống LCS trong quan trắc chất lượng không khí trong điều kiện môi trường của TP. Hà Nội.

Bảng 1. Thông tin vị trí 5 điểm lắp đặt LCS tại TP. Hà Nội

Địa chỉ trạm LCS	Kí hiệu trạm	Tọa độ	Thiết bị/ Kỹ thuật đo	Vị trí lắp đặt
Viện KH Khí tượng Thủy văn và Biến đổi khí hậu, ngõ 62 đường Nguyễn Chí Thanh, Hà Nội	LCS_ IMHEN	21° 1'16.47"N, 105°48'27.92"E	LCS (GBiot-FH0) Light Scattering	Nóc tòa nhà 5 tầng (cao 20 m), gần trục đường Nguyễn Chí Thanh và Huỳnh Thúc Kháng.
Trường Đại học Tài nguyên và Môi trường Hà Nội, 41A đường Phú Diễn	LCS_ HUNRE	21° 2'47.08"N, 105°45'44.71"E	LCS (GBiot-FH0) Light Scattering	Nóc tòa nhà 5 tầng (cao 20 m), nằm trong khu dân cư.
Viện KH Môi trường, Biển và hải đảo, 67 đường Chiến Thắng, Hà Đông	LCS_ VEMSI	20°58'55.28"N, 105°47'38.76"E	LCS (GBiot-FH0) Light Scattering	Nóc tòa nhà 5 tầng (cao 20 m), gần trục đường Trần Phú- Hà Đông.
Viện KH và Kỹ thuật Hạt nhân, số 179 đường Hoàng Quốc Việt	LCS_ INST	21° 2'43.83"N, 105°47'55.26"E	LCS (GBiot-FH0) Light Scattering	Nóc tòa nhà 4 tầng (cao 15 m), nằm cạnh tuyến đường Hoàng Quốc Việt
Ngã tư đường Giải Phóng- Đại Cồ Việt, Hà Nội	LCS_ BK	21° 0'21.88"N, 105°50'35.26"E	LCS (GBiot-FH0) Light Scattering	Nóc tòa nhà 5 tầng (cao 20 m), gần trục đường Giải Phóng và Đại Cồ Việt

Bảng 2. Thông tin 3 trạm tiêu chuẩn FEM của NCEM tại TP. Hà Nội

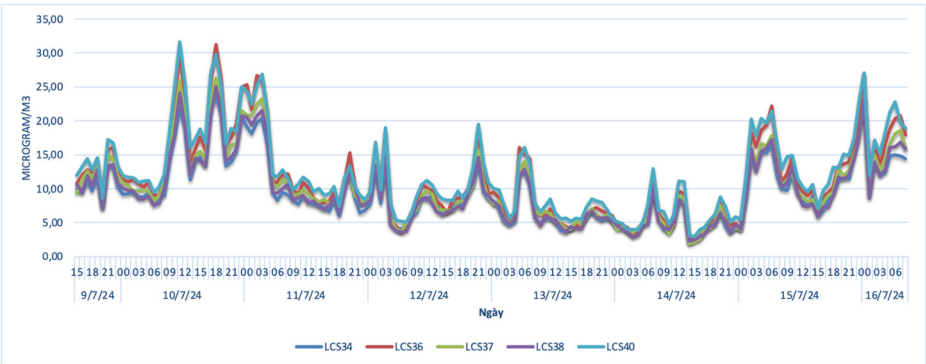
Địa chỉ trạm FEM	Kí hiệu trạm	Tọa độ	Thiết bị/ Kỹ thuật đo	Khoảng cách với các trạm LCS gần nhất
Số 556 đường Nguyễn Văn Cừ	FEM_ NVC	21°2'56.76"N, 105°52'59.16"E	BAM Thermo-5028i Beta attenuation	Khoảng cách giữa FEM_ NVC và LCS_ BK là 6,7 km; Khoảng cách giữa FEM_ NVC và LCS_ IMHEN là 8,5 km
Cổng Parabol Đại học Bách khoa Hà Nội, đường Giải Phóng	FEM_ BK	21°0'18.72"N, 105°50'30.48"E	BAM Thermo-5028i Beta attenuation	Khoảng cách giữa FEM_ BK và LCS_ BK là 250 m;
Công viên Nhân Chính, đường Khuất Duy Tiến	FEM_ NC	21°0'11.16"N, 105°47'40.92"E	BAM Thermo-5028i Beta attenuation	Khoảng cách giữa FEM_ NC và LCS_ IMHEN là 2,7 km. Khoảng cách giữa FEM_ NC và LCS_ VEMSI là 2,3 km. Khoảng cách giữa FEM_ NC và LCS_ INST là 4,7 km. Khoảng cách giữa FEM_ NC và LCS_ HUNRE là 5,8 km.

3. Kết quả và thảo luận

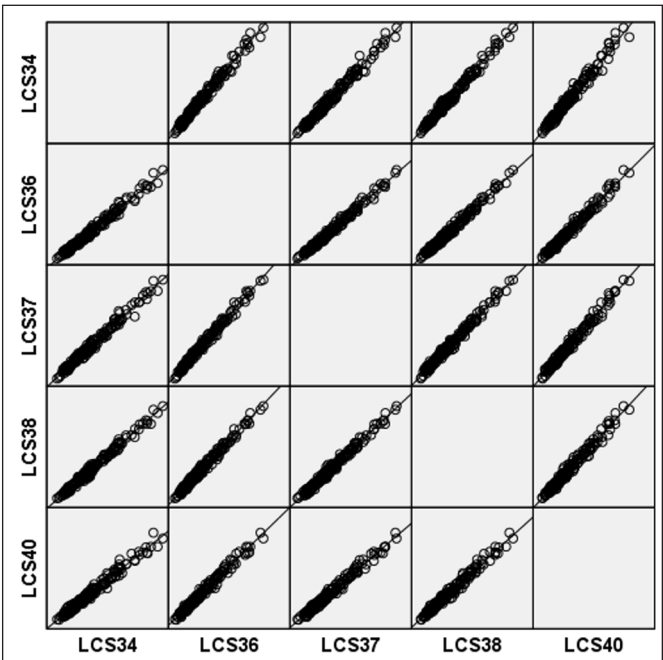
3.1. Đánh giá thiết bị LCS

Để đánh giá độ ổn định và chính xác của 5 thiết bị LCS nghiên cứu (mã số LCS. 34, LCS.36, LCS. 37, LCS. 38, LCS. 40) cần thực hiện bước kiểm tra song song và so sánh với thiết bị chuẩn

FEM trước khi tiến hành quan trắc thực sự. 5 LCS này được đặt tại cùng 1 vị trí (trên nóc tòa nhà 5 tầng của Viện Khoa học Khí tượng Thủy văn và Biến đổi khí hậu nay là Viện Khoa học, Khí tượng Thủy văn, Môi trường và Biển) và tiến hành phép đo song song trong khoảng thời gian 7 ngày, từ 09/7/2024 đến 16/7/2024 (Hình 3).



Hình 3. Kết quả đo nồng độ TBh $PM_{2.5}$ của 5 thiết bị LCS trong giai đoạn kiểm tra song song (9-16/7/2024)



Hình 4. Mối tương quan giữa 5 LCS trong giai đoạn kiểm tra song song

Kết quả kiểm tra song song cho thấy số liệu đo nồng độ từng phút $PM_{2.5}$ của 5 LCS có cùng biến trình, khoảng giá trị dao động từ 2-32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Kết quả đo của 5 LCS có mối tương quan rất cao với nhau ($R^2 = 0,97-0,99$). Mức độ tương quan cao nhất là giữa LCS36 với LCS37 và giữa LCS 38 với LCS 34, 36, 37. Mức độ tương quan thấp

nhất quan sát được giữa LCS34 và LCS40. Giá trị sai số giữa nồng độ $PM_{2.5}$ trung bình giờ của 5 LCS cũng khá nhỏ, có giá trị RMSE = 0,68 - 3,21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Bảng 3). Thêm vào đó, các đường hồi quy giữa từng cặp LCS vẫn rất gần điểm gốc tọa độ, có nghĩa là độ lệch không đáng kể (Hình 4). Điều này chứng tỏ sai số giữa các LCS là rất nhỏ.

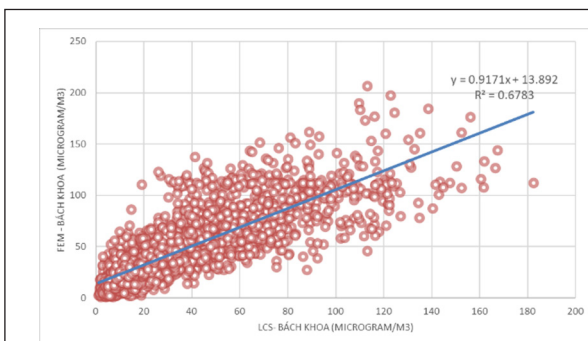
Bảng 3. Hệ số tương quan và sai số giữa các LCS

RMSE ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		LCS. 34	LCS. 36	LCS. 37	LCS.38	LCS.40
R^2						
LCS. 34		0	2,57	1,23	0,68	3,21
LCS. 36		1,00	0	1,57	2,21	1,15
LCS. 37		0,98	1,00	0	0,92	2,21
LCS.38		0,98	0,99	1,00	0	2,88
LCS.40		0,99	0,99	0,99	1,00	0
		0,97	0,98	0,98	0,98	1,00

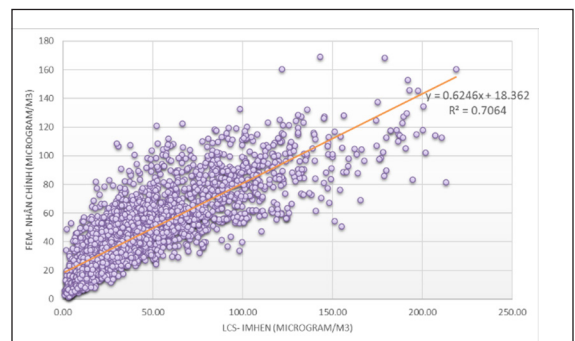
3.2. Chuẩn hóa số liệu đo LCS

Kết quả đo nồng độ $\text{PM}_{2.5}$ của các LCS được so sánh với kết quả đo của thiết bị chuẩn FEM-NCCEM gần nhất. Phân tích tương quan với thiết bị chuẩn FEM được thể hiện trong Hình 5-10 và các thông số hồi quy trong Bảng 4. Hệ số tương quan giữa các cặp LCS và FEM gần nhất dao động trong khoảng $R^2 = 0,59 - 0,74$. LCS- BK và LCS- INST cho thấy độ nhạy cao tương đương so với FEM (slope = 0,81 - 0,92), trong khi đó, LCS- IMHEN, LCS- VEMSI và LCS- HUNRE cho thấy độ nhạy thấp hơn (slope = 0,47- 0,63). Độ lệch của 5 LCS khá lớn so với FEM (intercept =

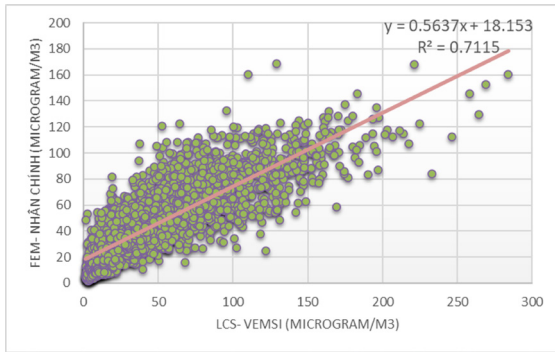
13,9 - 19,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Độ lệch của LCS- BK với FEM- Bách Khoa là nhỏ nhất (intercept = 13,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Tuy nhiên, so với FEM gần nhất thì cả 5 LCS có độ lệch chuẩn khá cao (SD = 15,3-20,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) và sai số khá lớn (RMSE = 18,7-36,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Như vậy, LCS- BK đáp ứng một số tiêu chí chuẩn hóa theo Hướng dẫn của US. EPA (2021) [11] về độ nhạy (slope) và tương quan (R^2) nhưng một số tiêu chí không đáp ứng do sự khác biệt về tiêu chí khoảng cách giữa LCS và FEM - khoảng cách >20 m [11]. Trong nghiên cứu này, các hệ số hồi quy của trạm Bách Khoa là tốt nhất và sẽ được sử dụng để chuẩn hóa số liệu đo của 5 LCS.



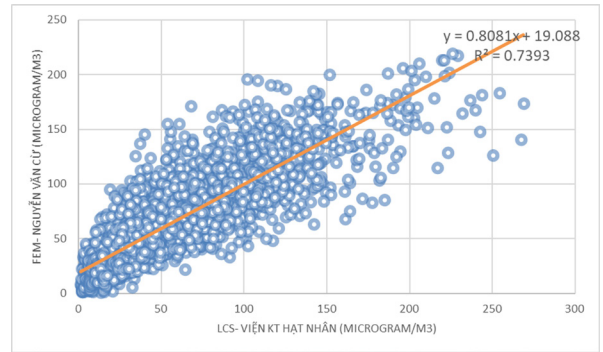
Hình 5. Mối tương quan giữa nồng độ $\text{PM}_{2.5}$ đo bởi LCS-Bách Khoa và trạm FEM- Bách Khoa (8/2024-12/2024)



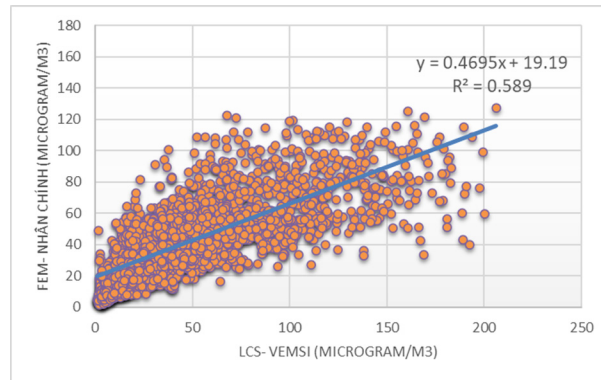
Hình 6. Mối tương quan giữa nồng độ $\text{PM}_{2.5}$ đo bởi LCS-IMHEN và trạm FEM- Nhân Chính (8/2024-12/2024)



Hình 7. Mối tương quan giữa nồng độ $PM_{2.5}$ đo bởi LCS-VEMSI và trạm FEM- Nhân Chính (8/2024-12/2024)



Hình 8. Mối tương quan giữa nồng độ $PM_{2.5}$ đo bởi LCS-INST và trạm FEM- Nguyễn Văn Cừ (8/2024-12/2024)



Hình 9. Mối tương quan giữa nồng độ $PM_{2.5}$ đo bởi LCS-HUNRE và trạm FEM- Nhân Chính (8/2024-12/2024)

Bảng 4. Phân tích hồi quy của 5 LCS với thiết bị chuẩn FEM gần nhất

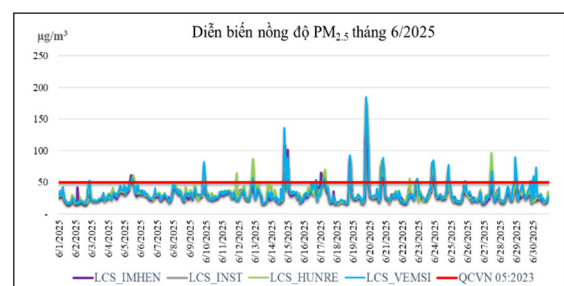
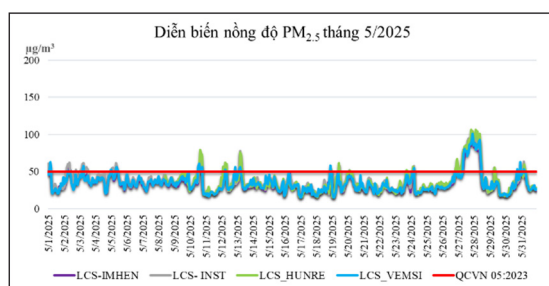
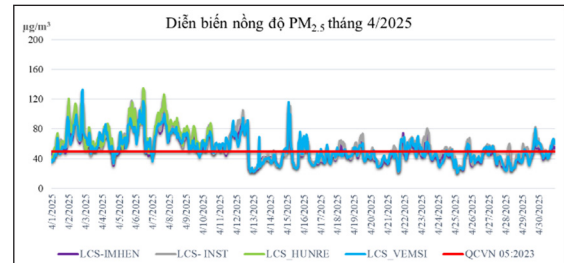
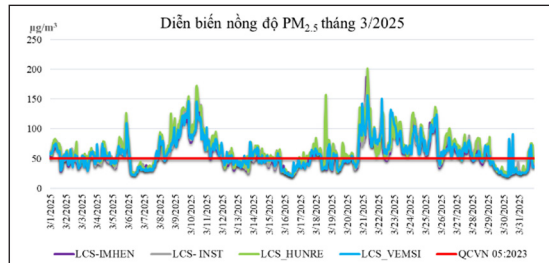
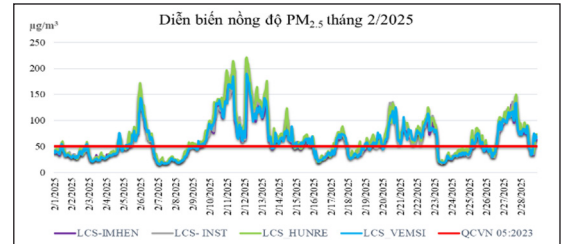
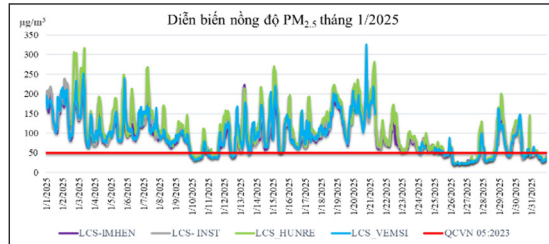
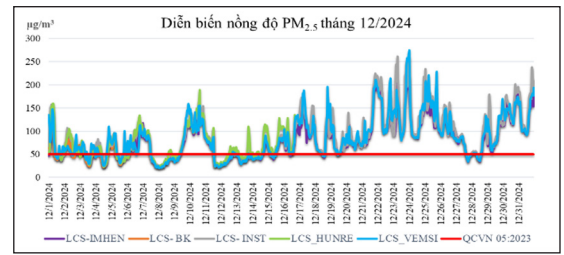
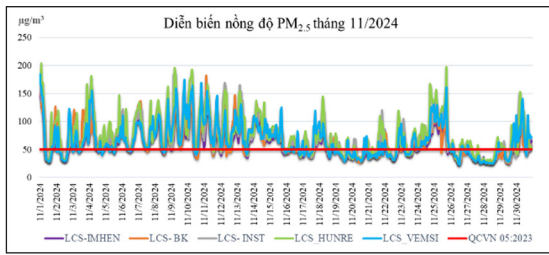
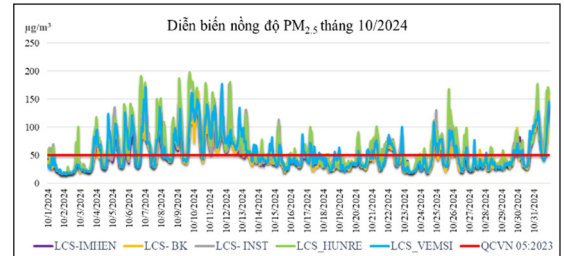
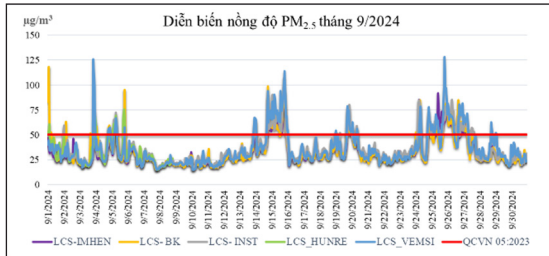
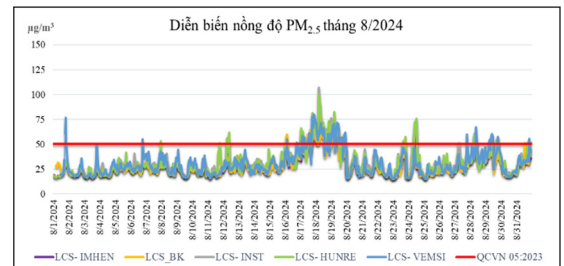
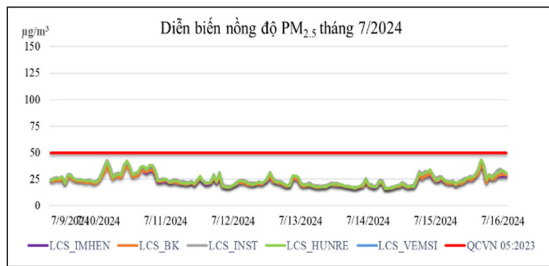
	LCS- BK và FEM- BK (*)	LCS- IMHEN và FEM- NC	LCS- VEMSI và FEM- NC	LCS- INST và FEM- NVC	LCS- HUNRE và LCS NC
Slope	0,92	0,63	0,56	0,81	0,47
Intercept ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	13,9	18,4	18,2	19,1	19,2
R^2	0,68	0,71	0,71	0,74	0,59
SD ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	17,5	15,3	19,8	19,8	20,1
RMSE ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	18,7	22,2	24,8	26,3	36,4

Ghi chú: (*) 2 trạm cùng vị trí

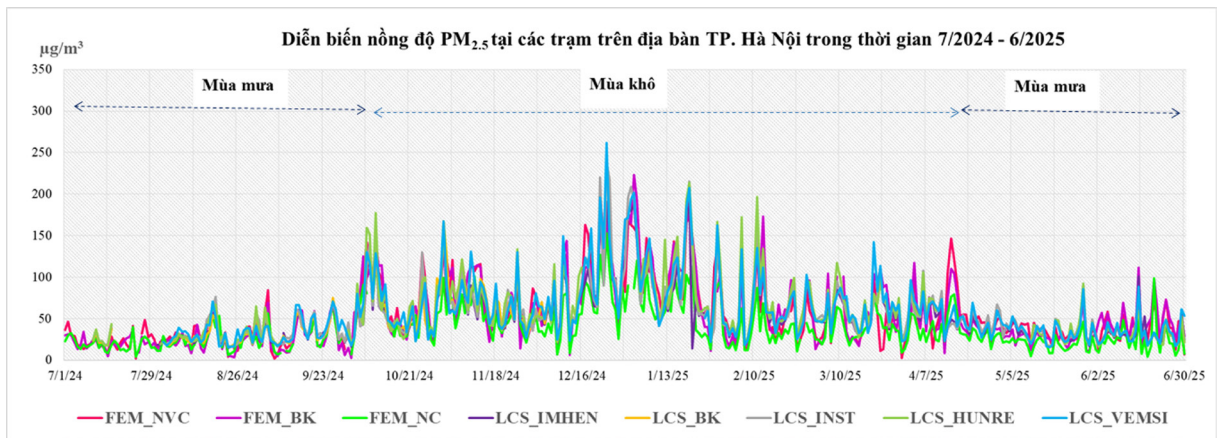
3.3. Đánh giá ô nhiễm $PM_{2.5}$ tại TP. Hà Nội

5 thiết bị LCS được lắp đặt tại 5 điểm phân bố trên địa bàn TP. Hà Nội và quan trắc $PM_{2.5}$ trong thời gian 1 năm (7/2024-6/2025) trong điều kiện mùa khô (từ tháng 10 đến tháng 4) với nhiệt độ 10-35°C, độ ẩm 40-90% và mùa mưa (từ tháng 5 đến tháng 9) với nhiệt độ 20-40°C, độ ẩm 50-98%. Số liệu quan trắc $PM_{2.5}$ bằng LCS

sau khi được chuẩn hóa theo trạm chuẩn FEM sẽ được sử dụng để đánh giá diễn biến và đặc trưng ô nhiễm $PM_{2.5}$ trong thời gian nghiên cứu (Hình 10). So sánh chuỗi số liệu quan trắc của 5 LCS và 3 trạm FEM của NCEM trong thời gian 1 năm cho thấy tương quan giữa các trạm rất cao (hệ số tương quan Pearson (r) = 0,82 - 0,85) trong cả mùa mưa và mùa khô (Hình 11).



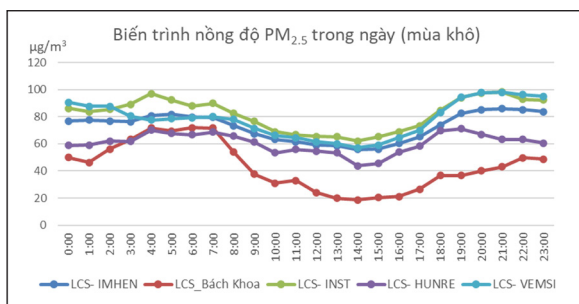
Hình 10. Kết quả quan trắc nồng độ TBH $PM_{2.5}$ của 5 thiết bị LCS trên địa bàn TP. Hà Nội (7/2024-6/2025)



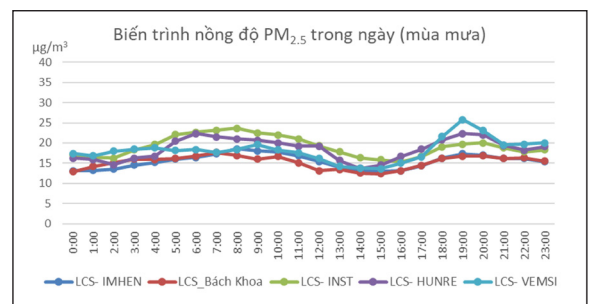
Hình 11. So sánh kết quả quan trắc nồng độ TBh $PM_{2.5}$ của 5 LCS và 3 trạm FEM-NCM trên địa bàn TP. Hà Nội (7/2024-6/2025)

Kết quả quan trắc chỉ ra rằng các tháng thời điểm mùa mưa (từ tháng 5 đến tháng 9) nồng độ $PM_{2.5}$ tại Hà Nội nhìn chung khá thấp, đạt QCVN 05:2023 (Hình 10 và 11). Tuy nhiên, vào thời điểm mùa khô (từ tháng 10 đến tháng 4 năm sau) nồng độ $PM_{2.5}$ tại Hà Nội tăng lên và gây ô nhiễm nghiêm trọng, vượt QCVN 05:2023 từ 2 - 4 lần, đỉnh điểm ô nhiễm $PM_{2.5}$ rơi vào tháng 12 và tháng 1 (Hình 10 và 11). Bên cạnh đó, kết quả quan trắc cũng chỉ ra rằng nồng độ $PM_{2.5}$ tại Hà Nội có dao động theo ngày. Tuy nhiên, dao động trong ngày này cũng thay đổi theo mùa, biến trình ngày thể hiện rất rõ trong mùa khô. Vào mùa khô, nồng độ $PM_{2.5}$ thường tăng cao

vào thời điểm từ 18 h chiều đến 7 h sáng hôm sau (Hình 12), giảm vào thời gian ban ngày. Vào mùa mưa, nồng độ $PM_{2.5}$ thường tăng vào thời điểm 7 h - 9 h sáng và 18 h - 20 h chiều (trùng với giờ cao điểm giao thông) (Hình 13). Ngoài ra, số liệu quan trắc còn cho thấy hình thể ô nhiễm $PM_{2.5}$ theo đợt trong các tháng mùa khô, mỗi đợt kéo dài từ 3-7 ngày (Hình 10). Có thể thấy rằng ô nhiễm $PM_{2.5}$ tại TP. Hà Nội chịu ảnh hưởng mạnh của các yếu tố khí tượng đặc trưng theo mùa như hiện tượng nghịch nhiệt và các đợt gió mùa Đông Bắc trong mùa đông - xuân. Điều này cũng đã được xác nhận bởi các nghiên cứu trước đây về ô nhiễm bụi $PM_{2.5}$ tại TP. Hà Nội [21-24].



Hình 12. Biến trình nồng độ TBh $PM_{2.5}$ trong ngày mùa khô (2024)



Hình 13. Biến trình nồng độ TBh $PM_{2.5}$ trong ngày mùa mưa (2025)

4. Kết luận

Kết quả kiểm tra song song cho thấy 5 thiết bị LCS (GBiot-FH0) có độ tương quan với nhau rất tốt ($R^2 = 0,97 - 0,99$), sai số giữa các LCS nhỏ ($RMSE = 0,68 - 3,21 \mu g/m^3$). Như vậy, các LCS này hoạt động ổn định và có tính nhất quán cao.

Về kết quả chuẩn hóa thiết bị LCS với thiết bị chuẩn FEM của NCEM trong thời gian 5 tháng (8/2024-12/2024), nhìn chung, 5 thiết bị LCS được lắp đặt tại 5 địa điểm trên địa bàn Hà Nội đều có tương quan khá tốt với trạm chuẩn FEM gần nhất ($R^2 = 0,59 - 0,74$), tuy nhiên, độ lệch

chuẩn khá cao ($SD = 15,3 - 20,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) và sai số khá lớn ($RMSE = 18,7 - 36,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$). LCS-Bách Khoa cùng vị trí với FEM- Bách Khoa có độ nhạy cao nhất ($\text{slope} = 0,92$), độ lệch nhỏ nhất ($\text{intercept} = 13,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$) và hệ số tương quan khá ($R^2 = 0,68$). Vì vậy, các hệ số hồi quy của trạm Bách Khoa được sử dụng để chuẩn hóa số liệu quan trắc của các LCS để thu được kết quả chính xác hơn.

Kết quả quan trắc bụi $\text{PM}_{2.5}$ của 5 LCS trong vòng 1 năm (7/2024-6/2025) tại 5 điểm phân bố trên địa bàn 5 quận nội thành cũ của TP. Hà Nội có biến trình tương đồng cao với nhau và với cả 3 trạm chuẩn FEM của NCEM (tương quan Pearson (r) = 0,82 - 0,85). Như vậy, kết quả cho thấy diễn biến nồng độ bụi $\text{PM}_{2.5}$ tại khu vực nội đô của TP. Hà Nội khá đồng nhất. Trong thời gian nghiên cứu, cả 5 LCS đều ghi nhận được các đợt ô nhiễm không khí tại TP. Hà Nội. Kết quả quan trắc chỉ ra rằng các tháng mùa mưa (từ tháng 5 đến tháng 9) nồng độ $\text{PM}_{2.5}$ tại TP. Hà Nội khá thấp, nhìn chung đạt QCVN 05:2023. Tuy nhiên, vào mùa khô (từ tháng 10 đến tháng 4 năm sau) nồng độ $\text{PM}_{2.5}$ tại TP. Hà Nội tăng cao và gây ô nhiễm nghiêm trọng, vượt QCVN 05:2023 từ 2-4 lần, đỉnh điểm ô nhiễm $\text{PM}_{2.5}$ rơi vào tháng 12 và tháng 1. Bên cạnh đó, kết quả quan trắc cũng chỉ ra rằng nồng độ $\text{PM}_{2.5}$ tại Hà Nội có

biến trình ngày và thay đổi theo mùa. Vào mùa khô (từ tháng 10 đến tháng 4 năm sau), nồng độ $\text{PM}_{2.5}$ thường tăng cao vào thời điểm ban đêm và sáng sớm, đồng thời ô nhiễm theo đợt (khoảng 3-7 ngày) do ảnh hưởng của hiện tượng nghịch nhiệt và các đợt gió mùa Đông Bắc. Kết quả này hoàn toàn phù hợp với kết quả của các nghiên cứu trước đây về ô nhiễm bụi mịn tại TP. Hà Nội [21-24].

Như vậy, thiết bị LCS này có khả năng ứng dụng cao trong quan trắc ô nhiễm bụi $\text{PM}_{2.5}$ trong điều kiện khí hậu, thời tiết của TP. Hà Nội. Tuy nhiên, cần lưu ý rằng các thiết bị LCS phải được định kỳ hiệu chuẩn, chuẩn hóa theo thiết bị chuẩn FEM trước và trong quá trình sử dụng để đảm bảo độ chính xác của số liệu. Kết quả nghiên cứu này cho thấy tiềm năng sử dụng thiết bị LCS trong phát triển mạng lưới quan trắc môi trường không khí tại Việt Nam với chi phí thấp và hiệu quả, đặc biệt khi kết hợp với các công nghệ như IoT (Internet vạn vật), HAQM (mạng quan trắc kết hợp), vệ tinh, mô hình... trong việc cung cấp thông tin cảnh báo ô nhiễm, giám sát lan truyền ô nhiễm. Trong tương lai khi công nghệ LCS phát triển và khoa học dữ liệu (học máy) được ứng dụng trong hiệu chuẩn, chuẩn hóa LCS sẽ mở rộng ứng dụng LCS cho nhiều mục đích khác [7], [11].

Đóng góp của từng tác giả trong bài báo: Xây dựng ý tưởng nghiên cứu: Lê Ngọc Cầu; Doãn Hà Phong; Ngô Thị Vân Anh; Tổng hợp tài liệu: Hồ Minh Tráng, Nguyễn Công Huy, Vương Như Luận, Đỗ Trường Thọ, Lê Văn Quy, Phạm Thị Quỳnh; Phân tích tài liệu, viết bản thảo bài báo: Doãn Hà Phong; Ngô Thị Vân Anh; Trần Việt Tùng; Chỉnh sửa bài báo: Lê Ngọc Cầu, Ngô Thị Vân Anh.

Lời cảm ơn: Nhóm tác giả xin chân thành cảm ơn Trung tâm Nghiên cứu ô nhiễm không khí Châu Á (ACAP) đã tặng 5 LCS (GBiot-FH0) cho nghiên cứu này. Đồng thời, chúng tôi cũng xin cảm ơn Trung tâm quan trắc Môi trường miền Bắc (NCEM) đã hợp tác và cung cấp số liệu quan trắc của các trạm tiêu chuẩn tại TP. Hà Nội.

Lời cam đoan: Tập thể tác giả cam đoan bài báo này là công trình nghiên cứu của mình, chưa từng công bố trước đó, không sao chép, đạo văn; không có sự tranh chấp lợi ích trong nhóm tác giả.

Tài liệu tham khảo

- [1] C. J. L. Murray et al., "Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990-2019: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019," *The Lancet*, vol. 396, no. 10258, pp. 1223-1249, 2020, doi: 10.1016/S0140-6736(20)30752-2.
- [2] World Health Organization, *Exposure to Ambient Air Pollution from Particulate Matter for 2016*, 2018. [Online]. Available: <https://cdn.who.int/media/docs/default-source/air-quality-database/>

aqd-2018/aap_exposure_apr2018_final.pdf?sfvrsn=86d2fad9_3. Accessed: October 13, 2026.

- [3] Bộ Tài nguyên và Môi trường, *Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng không khí của Việt Nam: QCVN 05:2023/BTNMT*. Hà Nội, Việt Nam, 2023.
- [4] Cục Kiểm soát ô nhiễm, *Hệ thống giám sát chất lượng không khí hybrid ở Việt Nam*. Hà Nội, Việt Nam, 2023.
- [5] Sở Tài nguyên và Môi trường Hà Nội, “Chỉ số AQI theo thời gian thực của các trạm quan trắc chất lượng không khí,” 2023. [Trực tuyến]. Available: <https://moitruongthudo.vn/>. Truy cập: 13/09/2025.
- [6] L. Liang, “Calibrating low-cost sensors for ambient air monitoring: Techniques, trends, and challenges,” *Environmental Research*, vol. 197, art. no. 111163, 2021, doi: 10.1016/j.envres.2021.111163.
- [7] World Meteorological Organization (WMO), *Low-Cost Sensors for the Measurement of Atmospheric Composition: Overview of Topic and Future Applications*, WMO-No. 1215. Geneva, Switzerland, 2018.
- [8] A. Mukherjee et al., “Measuring spatial and temporal PM_{2.5} variations in Sacramento, California, communities using a network of low-cost sensors,” *Sensors*, 19(21), 4701, 2019. <https://doi.org/10.3390/s19214701>.
- [9] R. Dejchanchaiwong et al., “Seasonal field calibration of low-cost PM_{2.5} sensors in different locations with different sources in Thailand,” *Atmosphere*, 14(3), 496, 2023, <https://doi.org/10.3390/atmos14030496/>
- [10] L. Bai et al., “Long-term field evaluation of low-cost particulate matter sensors in Nanjing,” *Aerosol Air Qual. Res.*, 20(2), 242-253, 2020, <https://doi.org/10.4209/aaqr.2018.11.0424>.
- [11] U.S. Environmental Protection Agency (U.S.EPA), *Performance Testing Protocols, Metrics, and Target Values for Fine Particulate Matter Air Sensor*. U.S. Environmental Protection Agency. Washington, DC, USA: U.S. EPA, 2021.
- [12] L. R. Crilley et al., “Evaluation of a low-cost optical particle counter (Alphasense OPC-N2) for ambient air monitoring,” *Atmos. Meas. Tech.*, 11(2), 709-720, 2018, <https://doi.org/10.5194/amt-11-709-2018>.
- [13] M. Tagle et al., “Field performance of a low-cost sensor in the monitoring of particulate matter in Santiago, Chile,” *Environ. Monit. Assess.*, 192(3), 171, 2020, <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8118-4>.
- [14] B. Feenstra et al., “Performance evaluation of twelve low-cost PM_{2.5} sensors at an ambient air monitoring site,” *Atmospheric Environment*, 216, 116946, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.116946>
- [15] K. E. Kelly et al., “Ambient and laboratory evaluation of a low-cost particulate matter sensor,” *Environmental Pollution*, 221, 491-500, 2017, [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.12.039](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.12.039)
- [16] H.-Y. Liu, P. Schneider, R. Haugen, and M. Vogt, “Performance assessment of a low-cost PM_{2.5} sensor for a near four-month period in Oslo, Norway,” *Atmosphere*, 10(2), 41. <https://doi.org/10.3390/atmos10020041>.
- [17] T. Zheng et al., “Field evaluation of low-cost particulate matter sensors in high- and low-concentration environments,” *Atmos. Meas. Tech.*, 11(8), 4823-4846, 2018, <https://doi.org/10.5194/amt-11-4823-2018>.
- [18] Tổng cục Thống kê, *Niên giám thống kê quốc gia Việt Nam*. Hà Nội, Việt Nam, 2022..
- [19] Bộ Tài nguyên và Môi trường, *Báo cáo quốc gia về hiện trạng môi trường quốc gia giai đoạn 2016-2020*. Hà Nội, Việt Nam, 2021.
- [20] Bộ Tài nguyên và Môi trường, *Báo cáo quốc gia về hiện trạng môi trường quốc gia - Môi trường không khí năm 2021*. Hà Nội, Việt Nam, 2022.

- [21] H. A. Lê, *Nghiên cứu xác định các nguồn đóng góp chính đối với bụi PM_{10} , $PM_{2.5}$ ở đô thị miền Bắc Việt Nam - Thực nghiệm tại Hà Nội, Quảng Ninh và Phú Thọ*. Đề tài KHCN cấp Bộ TNMT mã số 2018.04.01, Bộ Tài nguyên và Môi trường, 2021.
- [22] T. T. Thủy và cộng sự, “Nghiên cứu ảnh hưởng của hiện tượng nghịch nhiệt đến hàm lượng bụi $PM_{2.5}$ trong môi trường không khí tại Hà Nội,” *Tạp chí Khoa học ĐHQGHN: Các Khoa học Trái đất và Môi trường*, tập 34, số 3, 2018.
- [23] B. A. P. Ngoc et al., “Key factors explaining severe air pollution episodes in Hanoi during 2019 winter season,” *Aerosol and Air Quality Research*, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.101068>.
- [24] P. D. Hien et al., “Influence of meteorological conditions on $PM_{2.5}$ and $PM_{2.5-10}$ concentrations during the monsoon season in Hanoi, Viet Nam,” *Atmospheric Environment*, vol. 36, pp. 3473-3484, 2002.

FIELD TESTING OF LOW-COST SENSORS (LCS) FOR MONITORING $PM_{2.5}$ POLLUTION IN HANOI CITY’S ENVIRONMENTAL CONDITIONS

⁽¹⁾Doan Ha Phong, ^(1*)Ngo Thi Van Anh, ⁽¹⁾Le Ngoc Cau, ⁽¹⁾Le Van Quy,
⁽¹⁾Tran Viet Tùng, ⁽¹⁾Pham Thi Quynh, ⁽¹⁾Vu Xuan Hung, ⁽²⁾Ho Minh Trang,
⁽²⁾Nguyen Cong Huy, ⁽²⁾Vuong Nhu Luan, ⁽²⁾Do Truong Tho
⁽¹⁾Institute of Meteorology, Hydrology, Environment and Marine Sciences
⁽²⁾Northern Center for Environmental Monitoring

Received: 1/12/2025; Accepted: 6/2/2026

Abstract: Low-cost sensors (LCS) have been widely deployed in many countries for ambient air quality monitoring; however, their accuracy and stability require comprehensive evaluation, particularly under diverse climatic and meteorological conditions. This study tested five LCS units (GBiot-FH0) for $PM_{2.5}$ monitoring over a one-year period (July 2024-June 2025) under the environmental conditions of Hanoi city. Co-location test conducted prior to field monitoring showed very strong correlations among the five LCS units ($R^2 = 0.97 - 0.98$) and minimal error (RMSE = 0.68 - 3.21 $\mu g/m^3$). The calibration of the LCS data was performed against reference measurements from three Federal Equivalent Method (FEM) stations operated by the Northern Center for Environmental Monitoring (NCEM). The LCS exhibited strong correlations with the FEM stations of NCEM ($R^2 = 0.59 - 0.74$), with the highest sensitivity observed at Bach Khoa site (slope = 0.92). During the monitoring period, the LCS devices were installed at five selected sites across Hanoi city. The corrected LCS measurements were used to assess $PM_{2.5}$ pollution in Hanoi city. All five LCSs successfully captured $PM_{2.5}$ pollution episodes in Hanoi city (especially severely polluted episodes during the winter-spring season), and the diurnal variations were consistent with those recorded by FEM-NCEM. Overall, the findings demonstrate that the LCS units (GBiot-FH0) can be applied to $PM_{2.5}$ monitoring under Hanoi’s meteorological conditions. However, performance evaluation and measurement correction of LCSs are periodically required. Performance evaluation, calibration, and correction of LCS promote its application in developing air quality monitoring networks, especially in resource-limited areas.

Keywords: LCS, performance evaluation, $PM_{2.5}$ monitoring, air pollution, Hanoi city.