

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

NGHIÊN CỨU DIỄN BIẾN VÀ ĐẶC ĐIỂM CỦA BỤI MỊN
TRONG MÔI TRƯỜNG KHÔNG KHÍ
TẠI KHU VỰC BIÊN HÒA - TỈNH ĐỒNG NAI

LUẬN ÁN TIẾN SĨ
KHOA HỌC MÔI TRƯỜNG

Hà Nội - 2025

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

Bùi Duy Linh

NGHIÊN CỨU DIỄN BIẾN VÀ ĐẶC ĐIỂM CỦA BỤI MỊN
TRONG MÔI TRƯỜNG KHÔNG KHÍ
TẠI KHU VỰC BIÊN HÒA - TỈNH ĐỒNG NAI

Chuyên ngành: Khoa học Môi trường

Mã số: 9440301.01

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KHOA HỌC MÔI TRƯỜNG

CHỦ TỊCH HỘI ĐỒNG
ĐÁNH GIÁ LUẬN ÁN TIẾN SĨ

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC:

- PGS. TS. HOÀNG ANH LÊ
- TS. NGHIÊM XUÂN TRƯỜNG

GS.TS. Hoàng Xuân Cơ

Hà Nội - 2025

Lời cam đoan

Tôi xin cam đoan đây là kết quả nghiên cứu của riêng tôi và không trùng lặp với bất kỳ công trình khoa học nào khác. Các số liệu và kết quả phản ánh sự trung thực, đảm bảo tính liêm chính trong nghiên cứu khoa học. Các nội dung trong luận án là kết quả nghiên cứu của tôi dưới sự hướng dẫn của tập thể giáo viên hướng dẫn, bao gồm: PGS.TS. Hoàng Anh Lê (Trưởng Bộ môn Quản lý môi trường, Khoa Môi trường, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội) và Đại tá, TS. Nghiêm Xuân Trường (Phân viện trưởng Phân viện Hóa Môi trường/Trung tâm Nhiệt đới Việt Nga, Bộ Quốc phòng).

Hà Nội, ngày tháng năm 2025

Tác giả luận án

Bùi Duy Linh

Lời cảm ơn

Trước hết, tôi xin bày tỏ lòng biết ơn chân thành và sâu sắc tới tập thể giáo viên hướng dẫn PGS.TS. Hoàng Anh Lê (Trưởng Bộ môn Quản lý môi trường, Khoa Môi trường, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên) và TS. Nghiêm Xuân Trường (Phân viện trưởng Phân viện Hóa - Môi trường/Trung tâm Nhiệt đới Việt - Nga) đã tận tình hướng dẫn và dìu dắt tôi trong quá trình nghiên cứu và hoàn thành luận án.

Trong quá trình nghiên cứu vừa qua, tôi đã nhận được sự giúp đỡ và chỉ bảo tận tình của tập thể cán bộ Viện Công nghệ Môi trường, Viện Vật liệu - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam đã quan tâm giúp đỡ tôi trong quá trình thực hiện nghiên cứu và các thí nghiệm trong thời gian thực hiện Luận án

Tôi cũng xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc Đảng ủy Trung tâm, Chi bộ Phân viện, Ban lãnh đạo và các đồng nghiệp trong Phòng thí nghiệm phân tích Dioxin, Phân viện Hóa - Môi trường/Trung tâm nhiệt đới Việt - Nga đã tạo mọi điều kiện, hỗ trợ tốt nhất cho tôi trong suốt quá trình học tập và nghiên cứu.

Tôi xin trân trọng cảm ơn các thầy, cô trong Bộ môn Quản lý môi trường, Khoa môi trường, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, nơi tôi được phân công sinh hoạt chuyên môn trong suốt thời gian thực hiện Luận án. Trân trọng cảm ơn ban Lãnh đạo Khoa Môi trường, các cán bộ Khoa Môi trường đã luôn luôn tạo mọi điều kiện tốt nhất cho tôi trong thời gian học tập.

Bên cạnh đó, tôi xin bày tỏ lời cảm ơn sâu sắc nhất đến người thân trong gia đình và bạn bè đã tạo điều kiện động viên giúp đỡ tôi về cả vật chất và tinh thần để tôi có thể hoàn thành bản luận án này.

Một lần nữa tôi xin chân thành cảm ơn!

Tác giả luận án

Bùi Duy Linh

MỤC LỤC

MỞ ĐẦU	1
CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU	6
1.1. Tổng quan về hiện trạng và các đặc trưng của bụi PM_{2.5}	6
1.1.1. Định nghĩa và tính chất cơ bản của bụi PM _{2.5}	6
1.1.2. Đặc điểm tính chất vật lý của bụi PM _{2.5}	9
1.1.3. Đặc điểm hóa học của bụi PM _{2.5}	12
1.2. Nguồn phát sinh của bụi PM_{2.5}	13
1.3. Nguyên lý và phương pháp lấy mẫu bụi PM_{2.5}	16
1.4. Các yếu tố ảnh hưởng đến nồng độ bụi PM_{2.5} trong môi trường không khí.	18
1.4.1. Độ ẩm	18
1.4.2. Nhiệt độ	19
1.4.3. Lượng mưa	19
1.4.4. Tốc độ gió và hướng gió	20
1.4.5. Áp suất bề mặt và các yếu tố chiều cao lớp hòa trộn đối lưu (PBL).....	20
1.4.6. Thảm thực vật.....	20
1.4.7. Ảnh hưởng của nhà ở và các công trình xây dựng khác	21
1.5. Phương pháp xác định nguồn phát sinh bụi PM_{2.5} trong môi trường	21
1.5.1. Phương pháp đánh giá tương quan.....	24
1.5.2. Phương pháp phân tích thành phần chính	25
1.5.3. Phương pháp mô hình hóa.....	27
1.6. Ảnh hưởng của bụi PM_{2.5} đến kinh tế, môi trường và sức khỏe con người.	34
1.6.1. Ảnh hưởng đến kinh tế	34
1.6.2. Ảnh hưởng đến biến đổi khí hậu	35
1.6.3. Ảnh hưởng đến sinh vật	36
1.6.4. Ảnh hưởng đến việc suy giảm tầm nhìn.....	36

1.6.5. Ảnh hưởng đến sức khỏe con người.....	37
1.7. Tổng quan nghiên cứu về vấn đề ô nhiễm bụi PM_{2.5}.....	39
1.7.1. Tổng quan các nghiên cứu trên thế giới về ô nhiễm bụi PM _{2.5}	40
1.7.2. Tổng quan các nghiên cứu ở Việt Nam về ô nhiễm bụi PM _{2.5}	43
1.8. Tổng quan về thành phố Biên Hòa, tỉnh Đồng Nai	46
CHƯƠNG 2. MỤC TIÊU, ĐỐI TƯỢNG, PHẠM VI VÀ PHƯƠNG PHÁP	
NGHIÊN CỨU.....	50
2.1. Mục tiêu, đối tượng và phạm vi nghiên cứu	50
2.1.1. Mục tiêu nghiên cứu.....	50
2.1.2. Đối tượng nghiên cứu.....	50
2.1.3. Phạm vi nghiên cứu.....	52
2.2. Các phương pháp nghiên cứu.....	52
2.2.1. Phương pháp tổng hợp tài liệu	52
2.2.2. Phương pháp quan trắc mẫu bụi PM _{2.5}	53
2.2.3. Phương pháp xác định nồng độ bụi PM _{2.5}	56
2.2.4. Phương pháp xác định phân bố kích thước hạt trong mẫu bụi PM _{2.5}	56
2.2.5. Xác định tính chất hóa học của bụi PM _{2.5}	58
2.2.6. Phương pháp mô hình nguồn tiếp nhận.....	61
2.2.7. Xác định hệ số làm giàu	64
2.2.8. Đánh giá rủi ro phơi nhiễm đối với sức khỏe con người	66
2.3. Đảm bảo chất lượng và kiểm soát chất lượng (QA/QC).....	68
2.3.1. Lấy mẫu hiện trường	68
2.3.2. Phân tích đặc tính hóa lý	69
CHƯƠNG 3: KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN.....	70
3.1. Diễn biến nồng độ bụi PM_{2.5} tại thành phố Biên Hòa, tỉnh Đồng Nai	70
3.1.1. Chương trình quan trắc bụi PM _{2.5} tại thành phố Biên Hòa, tỉnh Đồng Nai	70
3.1.2. Diễn biến nồng độ bụi PM _{2.5}	74
3.1.3. Yêu cầu dữ liệu đầu vào của mô hình PMF	82

3.2. Các đặc điểm hóa – lý của bụi PM_{2.5} tại thành phố Biên Hòa, tỉnh Đồng Nai	83
3.2.1. Phân cấp kích thước trong mẫu bụi PM _{2.5}	83
3.2.2. Đặc tính hóa học của bụi PM _{2.5}	88
3.3. Kết quả mô hình hóa xác định quỹ đạo di chuyển và xác định nguồn đóng góp bụi PM_{2.5} đến chất lượng không khí thành phố Biên Hòa, tỉnh Đồng Nai.	100
3.3.1. Kết quả quỹ đạo di chuyển của bụi PM _{2.5} xác định bằng mô hình HYSPLIT	100
3.3.2. Kết quả định danh nguồn đóng góp vào bụi PM _{2.5} tại khu vực nghiên cứu bằng mô hình PMF	107
3.4. Đánh giá mức độ ảnh hưởng của bụi PM_{2.5} đến sức khỏe con người tại thành phố Biên Hòa - tỉnh Đồng Nai	115
3.4.1. Xác định các kim loại đã được làm giàu	115
3.4.2. Đánh giá mức độ ảnh hưởng của bụi PM _{2.5} đến sức khỏe con người	117
3.5. Đề xuất các giải pháp giảm thiểu chất ô nhiễm tại địa bàn nghiên cứu	123
3.5.1. Các nhóm nguồn có thể kiểm soát được	124
3.5.2. Các nhóm nguồn cần phối hợp	126
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ	128
KẾT LUẬN	128
KIẾN NGHỊ	129
DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH NGHIÊN CỨU KHOA HỌC VÀ ĐÀO TẠO	131
Các công trình đã công bố liên quan đến nội dung Luận Án	131
TÀI LIỆU THAM KHẢO	133

DANH MỤC CHỮ VIẾT TẮT

Từ/cụm từ	Diễn nghĩa	Từ gốc
ARL	Phòng thí nghiệm tài nguyên không khí	Air Resources Laboratory
CLKK	Chất lượng không khí	
CLKKXQ	Chất lượng không khí xung quanh	
CMB	Mô hình thụ thể cân bằng khối lượng	Chemical mass balance
DMRT	Kiểm định khoảng cách nhiều lần của Duncan	Duncan's Multiple Range Test
HYSPLIT	Mô hình tích hợp quỹ đạo hạt đơn theo hướng Lagrangian	Hybrid Single - Particle Lagrangian Integrated Trajectories
IARC	Cơ quan Nghiên cứu Ung thư Quốc tế	International Agency for Research on Cancer
KCN	Khu công nghiệp	
KKXQ	Không khí xung quanh	
LB	Phường Long Bình	
NCAR	Trung tâm nghiên cứu khí quyển quốc gia Hoa Kỳ	National Center for Atmospheric Research
NCEP	Trung tâm Dự báo Môi trường Quốc gia	National Centers for Enviromental Prediction
NOAA	Cơ quan Quản lý Đại dương và Khí quyển Quốc gia	National Oceanic and Atmospheric Administration
ÔNKK	Ô nhiễm không khí	
ÔNMT	Ô nhiễm môi trường	
PBL	Lớp hòa trộn đối lưu	Planetary Boundary Layer

Từ/cụm từ	Diễn nghĩa	Từ gốc
PM₁₀	Các hạt bụi có đường kính khí động học $\leq 10\mu\text{m}$	Particulate Matter 10
PM_{2.5}	Các hạt bụi có đường kính khí động học $\leq 2.5\mu\text{m}$	Particulate Matter 2.5
PMF	Phân tích nhân tố ma trận dương	Positive Matrix Factorization
SB	Khu vực Công 2 sân bay Biên Hòa	
SEM	Kính hiển vi điện tử quét	Scanning Electron Microscopy
US. EPA	Cơ quan Bảo vệ Môi trường Hoa Kỳ	United States Environmental Protection Agency
WHO	Tổ chức Y tế Thế giới	World Health Organization
WRF	Mô hình nghiên cứu và dự báo thời tiết	Weather Research and Forecast

DANH MỤC HÌNH

Hình 1. 1: Kích thước các loại bụi mịn	7
Hình 1.2: Quy định về giới hạn nồng độ bụi $PM_{2.5}$ ở Việt Nam, một số quốc gia và các tổ chức khác trên thế giới.....	8
Hình 1.3: Tương quan về kích thước hạt của bụi $PM_{2.5}$ và các thành phần khác	9
Hình 1. 4: Mô tả kích thước và thời gian tồn tại của các hạt bụi	10
Hình 1. 5: Mô tả hình thái khác nhau của các hạt bụi $PM_{2.5}$	11
Hình 1. 6: Các thành phần hóa học trong bụi $PM_{2.5}$	12
Hình 1. 7: Một số nguồn ô nhiễm tự nhiên gây ra bụi $PM_{2.5}$ vào khí quyển	14
Hình 1. 8: Một số nguồn gây ô nhiễm nhân tạo gây ra bụi $PM_{2.5}$ vào khí quyển	15
Hình 1. 9: Hình ảnh quá trình chuyển động của các hạt bụi	17
Hình 1. 10: Lịch sử phát triển các loại công cụ, mô hình nhận dạng phân bố đóng góp nguồn ÔNKK	23
Hình 1. 11: Sự suy giảm tầm nhìn do ảnh hưởng của bụi $PM_{2.5}$	37
Hình 1. 12: Tác động của kích thước hạt đến các bộ phận của hệ hô hấp trong cơ thể con người.....	38
Hình 1. 13: Bản đồ toàn cầu về nồng độ bụi $PM_{2.5}$ ước tính theo quốc gia / khu vực vào năm 2019	39
Hình 1. 14: Nồng độ trung bình hàng năm của $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$) tại các thành phố trên thế giới.....	40
Hình 1. 15: Bản đồ khu vực nghiên cứu	46
Hình 2. 1: Khung logic tiếp cận nghiên cứu của Luận án.....	51
Hình 2. 2: Máy lấy mẫu thể tích lớn TE -1000DBLX	54
Hình 2. 3: Quy trình lấy mẫu ngoài hiện trường.....	55
Hình 2. 4: Nguyên lý hoạt động của kính hiển vi điện tử quét SEM.....	58
Hình 3. 1: Bản đồ vị trí lấy mẫu.....	72
Hình 3. 2: Tương quan tổng chất phân tích và nồng độ bụi vào mùa mưa.....	73
Hình 3. 3: Tương quan tổng chất phân tích và nồng độ bụi vào mùa khô.....	74

Hình 3. 4: Diễn biến nồng độ bụi $PM_{2.5}$ tại hai vị trí trong giai đoạn nghiên cứu mùa mưa (a) và mùa khô (b).....	77
Hình 3. 5: Biểu đồ so sánh nồng độ bụi ở một số thành phố trong thời gian bị ảnh hưởng bởi Covid - 19	79
Hình 3. 6: Nhiệt độ, lượng mưa và hướng gió trong thời gian lấy mẫu	80
Hình 3. 7: Các giá trị nồng độ của mùa mưa và mùa khô.....	82
Hình 3.8: Hình ảnh chụp dưới kính hiển vi điện tử SEM	83
Hình 3. 9: Kết cấu dạng bồ hóng.....	84
Hình 3. 10: Kết cấu dạng hình cầu	85
Hình 3. 11: Kết cấu dạng khoáng.....	86
Hình 3. 12: Các kết cấu dạng siêu mịn khác	86
Hình 3. 13 Tỷ lệ phần trăm kích thước các hạt bụi.....	87
Hình 3. 14: Nồng độ kim loại giữa hai vị trí SB và LB	91
Hình 3. 15: Giá trị thử nghiệm phép chia khoảng duncan	94
Hình 3. 16: Tỷ lệ phần trăm của các nguyên tố	95
Hình 3. 17: Tương quan tổng đương lượng cation và anion vị trí SB (a) và vị trí LB (b).....	99
Hình 3. 18: Tỷ lệ phần trăm của kim loại và các ion theo từng mùa	100
Hình 3. 19: Kết quả CWT của bụi $PM_{2.5}$ đối với mùa mưa (a) và mùa khô (b)	103
Hình 3. 20: Kết quả phân cụm đối với mùa mưa (a) và mùa khô (b)	104
Hình 3. 21: Nhân tố đốt sinh khối	110
Hình 3. 22: Nhân tố bụi đất.....	110
Hình 3. 23: Nhân tố Bụi thứ cấp	111
Hình 3. 24: Nhân tố Giao thông.....	111
Hình 3. 25: Nhân tố Giao thông đường thủy.....	112
Hình 3. 26: Nhân tố Công nghiệp	113
Hình 3. 27: Phần trăm đóng góp của các nhân tố đến nồng độ bụi $PM_{2.5}$	115
Hình 3. 28: Giá trị EF của các kim loại	116
Hình 3. 29: Chỉ số HI	121

DANH MỤC BẢNG BIỂU

Bảng 2. 1: Phân loại mức độ làm giàu EF dựa theo phân loại của Qijun Zhang.....	65
Bảng 2. 2: Hằng số được sử dụng cho các công thức đánh giá rủi ro sức khỏe đối với người lớn và trẻ con	67
Bảng 3. 1: Vị trí nghiên cứu.....	71
Bảng 3. 2: Nồng độ bụi $PM_{2.5}$ ở hai vị trí nghiên cứu TP Biên Hòa, Đồng Nai.....	74
Bảng 3. 3: Bảng so sánh nồng độ bụi $PM_{2.5}$ với các địa điểm trên thế giới trong thời gian bị ảnh hưởng bởi covid-19	78
Bảng 3. 4: Nồng độ của các kim loại trong bụi $PM_{2.5}$ ở vị trí SB.....	89
Bảng 3. 5: Nồng độ của các kim loại trong bụi $PM_{2.5}$ ở vị trí LB.....	90
Bảng 3. 6: Mối tương quan về nồng độ các kim loại giữa hai vị trí SB và LB	93
Bảng 3. 7: So sánh nồng độ kim loại với các nghiên cứu khác	97
Bảng 3. 8: Nồng độ các ions chính trong bụi $PM_{2.5}$ tại khu vực nghiên cứu.....	98
Bảng 3. 9: Thống kê nồng độ bụi $PM_{2.5}$ tính cho các cụm quỹ đạo.....	102
Bảng 3. 10: Bảng giá trị xử lý dữ liệu đầu vào của mô hình PMF	108
Bảng 3. 11: Bảng giá trị các kim loại được xác định trong lớp vỏ trái đất.....	116
Bảng 3. 12: Bảng giá trị các tham số	118
Bảng 3. 13: Kết quả rủi ro ung thư đối với người lớn và trẻ nhỏ	119

MỞ ĐẦU

1. Lý do chọn đề tài luận án

Không khí là một trong ba yếu tố quan trọng (bên cạnh nước và thực phẩm) của sự sống, phục vụ nhu cầu phát triển kinh tế và xã hội của chúng ta. Ô nhiễm môi trường (ÔNMT) nói chung, ô nhiễm không khí (ÔNKK) nói riêng là vấn đề môi trường toàn cầu, xảy ra ở hầu khắp các quốc gia trên thế giới ở quy mô khác nhau, không ngoại trừ là nước nghèo hay quốc gia giàu có. Tổ chức Y tế Thế giới (WHO) đưa ra thống kê có đến hơn 90% dân số thế giới hiện đang phải sống trong bầu không khí bị ô nhiễm, gây ảnh hưởng nghiêm trọng đến sức khỏe và chất lượng cuộc sống. Do vậy, việc tìm hiểu nguyên nhân gây ÔNKK cũng như tìm kiếm các giải pháp hữu ích nhằm khắc phục tình trạng ÔNKK có một ý nghĩa khoa học và thực tiễn hết sức quan trọng trong việc nâng cao chất lượng cuộc sống của con người, vì sự tiến bộ của xã hội.

Khu vực châu Á, trong đó có Việt Nam, được đánh giá là những quốc gia có mức ÔNKK nghiêm trọng nhất. Thông thường, chất lượng không khí xung quanh (CLKKXQ) được đánh giá dựa vào sáu thành phần chất ô nhiễm cơ bản bao gồm: bụi (TSP, PM₁₀ và PM_{2.5}), CO, SO₂, NO_x, O₃ và Pb trong các nghiên cứu và chương trình quản lý nhà nước về môi trường. Trong các thành phần cơ bản đó thì bụi PM_{2.5} luôn là thông số quan trọng được quan tâm và chú ý nhất. Thuật ngữ bụi PM_{2.5} dùng để chỉ các hạt vật chất có đường kính khí động học $\leq 2,5 \mu\text{m}$ theo QCVN 05:2023/BTNMT. Các hạt bụi này có kích thước rất nhỏ nên chúng có khả năng di chuyển rất xa nguồn phát thải theo quỹ đạo rất phức tạp [33] phụ thuộc các điều kiện khí tượng, địa hình khác nhau và độc tính của chúng phụ thuộc vào tính chất lý - hóa của hạt [32, 58]. Các hạt có kích thước nhỏ nên chúng có thể xâm nhập sâu vào phổi qua hệ thống hô hấp, tới tim và di chuyển vào mạch máu dẫn đến ảnh hưởng nghiêm trọng đối với sức khỏe con người [75]. ÔNKK còn là mối đe dọa lớn đối với khí hậu và các hệ sinh thái nhạy cảm. Theo báo cáo của WHO vào năm 2021, tác động của

ÔNKK (cả trong nhà và ngoài trời) đã gây ra khoảng 7 triệu ca tử vong hàng năm do gia tăng tỷ lệ tử vong bởi đột quỵ, bệnh tim, tắc nghẽn phổi mãn tính, ung thư phổi và nhiễm trùng đường hô hấp cấp tính [140]. Bụi $PM_{2.5}$ trong không khí có thể được sinh ra bởi rất nhiều nguồn khác nhau, bao gồm cả trong tự nhiên lẫn trong các hoạt động sinh hoạt, phát triển kinh tế - xã hội của con người. Các hoạt động nhân sinh đóng góp đáng kể tổng lượng chất ô nhiễm vào môi trường như hoạt động công nghiệp, nông nghiệp, giao thông vận tải, đốt nguyên - nhiên liệu hóa thạch.

Ngày nay, nguồn và tính chất vật lý của các hạt bụi $PM_{2.5}$ (kích thước, hình dạng, kết cấu) đã và đang được chú trọng nghiên cứu để tìm hiểu về cơ chế tác động của chúng đối với môi trường và sức khỏe con người. Gần đây, các nhà khoa học phát hiện ra những tác động của các hạt sol khí phụ thuộc rất nhiều vào kích thước hạt của nó, nói cách khác thì bụi có kích thước hạt càng nhỏ càng có khả năng tác động lớn đến sức khỏe con người [100]. Kích thước hạt đóng một vai trò quan trọng đối với tốc độ lắng đọng của các hạt trên bề mặt Trái đất, hoặc sự thâm nhập của hạt sol khí khi được hít vào các vùng khác nhau của hệ thống hô hấp. Ở Việt Nam, các nghiên cứu về ÔNKK chủ yếu được triển khai ở hai thành phố lớn, tập trung dân cư và có mức ô nhiễm cao nhất cả nước là Hà Nội và thành phố Hồ Chí Minh [5, 32, 54, 124]. Tuy nhiên, rất ít các nghiên cứu về phân bố cấp hạt [5] và đặc biệt chưa có các nghiên cứu về hình thái hạt. Các nghiên cứu phân cấp hạt thường sử dụng các thiết bị lấy mẫu phân tầng Cascade Impactor (*Tisch Environment, Inc.*) hoặc Nanosampler II (*Kanomax Japan Inc.*). Theo đó các cấp độ kích thước hạt bụi được lấy mẫu đồng thời theo cấp bậc phân loại định sẵn của các nhà sản xuất cùng với đó không thể quan sát được hình thái, kết cấu của các hạt bụi có kích thước nhỏ. Hiện nay, với sự hỗ trợ của khoa học kỹ thuật, các nhà khoa học trên thế giới đã và đang có nhiều nghiên cứu chuyên sâu hơn bằng các công cụ hiện đại như chụp và phân tích mẫu bụi bằng phương pháp kính hiển vi điện tử quét (*Scanning Electron Microscopy - SEM*) cho các kết quả về kích thước hạt, hình thái và kết cấu của hạt ở độ phân giải cao và đáng tin cậy hơn. Về tính chất hóa học đối với các nghiên cứu trước chủ yếu là các nghiên cứu chỉ dừng lại ở mức xác định nguồn và cũng chỉ tập chung ở các thành phố đông

dân cư. Tuy vậy các nghiên cứu này chưa đưa ra được những đánh giá, cảnh báo mức độ rủi ro đối với sức khỏe con người. Các nghiên cứu gần đây đã tập trung vào ÔNKK gây ra bởi sự hiện diện của các hạt bụi trong khí quyển được cho là có liên quan chặt chẽ đến các bất lợi cho sức khỏe con người cũng như gây thiệt hại cho môi trường và sự nóng lên toàn cầu. Trong những năm gần đây, số lượng nghiên cứu về bụi PM_{2.5} trong không khí đã gia tăng đáng kể, không chỉ tại các quốc gia phát triển mà còn ở nhiều quốc gia đang phát triển, đặc biệt là Trung Quốc, Ấn Độ và các nước Đông Nam Á như Thái Lan [28, 58, 74, 158].

Thành phố Biên Hòa, tỉnh Đồng Nai, nằm ở khu vực Đông Nam Bộ, là địa phương tập trung nhiều khu công nghiệp (KCN) lớn nhỏ khác nhau và có vị trí địa lý giáp ranh với các trung tâm kinh tế - công nghiệp lớn như TP. Hồ Chí Minh ngày nay, do đó chất lượng không khí (CLKK) tại khu vực này có nguy cơ chịu tác động đáng kể từ hoạt động công nghiệp và giao thông [171]. Biên Hòa đồng thời là cửa ngõ giao thương quan trọng, với hệ thống hạ tầng giao thông huyết mạch và mật độ phương tiện vận tải hàng hóa cao, góp phần làm gia tăng áp lực ÔNKK. Tuy nhiên, thống kê cho thấy số lượng công trình nghiên cứu khoa học về CLKK và các yếu tố ảnh hưởng tại địa phương còn hạn chế. Gần đây, các dự án xử lý, khắc phục ô nhiễm dioxin tại sân bay Biên Hòa cũng được triển khai, tiềm ẩn khả năng làm phát tán bụi và sol khí ra môi trường [126, 190]. Nhìn chung, sự tác động tổng hợp của nhiều nguồn gây ô nhiễm địa phương cho thấy việc nghiên cứu sâu về chất lượng không khí tại Biên Hòa là hết sức cần thiết và có ý nghĩa thực tiễn.

Xuất phát từ các lý do nêu trên, tôi đã lựa chọn đề tài ***“Nghiên cứu diễn biến và đặc điểm của bụi mịn trong môi trường không khí tại khu vực Biên Hòa - Tỉnh Đồng Nai”*** để thực hiện Luận án tiến sĩ, ngành Khoa học môi trường. Kết quả của Luận án góp phần thúc đẩy định hướng nghiên cứu mới này ở Việt Nam, đặc biệt ở các thành phố lớn ngoài Hà Nội và thành phố Hồ Chí Minh, góp phần vào công tác bảo vệ môi trường không khí, nâng cao chất lượng cuộc sống cộng đồng ở nước ta.

2. Mục tiêu, đối tượng và phạm vi nghiên cứu

2.1. Mục tiêu nghiên cứu

Mục tiêu chính của Luận án: Nghiên cứu được diễn biến và các đặc điểm hóa - lý của bụi $PM_{2.5}$ trong môi trường không khí trên địa bàn thành phố Biên Hòa, tỉnh Đồng Nai.

Để đạt được mục tiêu chính nêu trên, một số *mục tiêu cụ thể* của Luận án được đặt ra như sau:

- Xác định được diễn biến nồng độ bụi $PM_{2.5}$ theo thời gian và không gian trong không khí trên địa bàn thành phố Biên Hòa, tỉnh Đồng Nai.
- Phân tích được các đặc trưng hóa - lý của bụi $PM_{2.5}$ thông qua các chỉ số về nồng độ, phân bố kích thước hạt, các nguyên tố, các ions.
- Ứng dụng công cụ mô hình hóa (*mô hình HYSPLIT, PMF*) để mô phỏng được quỹ đạo di chuyển và xác định cụ thể các nguồn thải tiềm năng đóng góp lượng bụi $PM_{2.5}$ đến CLKK khu vực thành phố Biên Hòa, tỉnh Đồng Nai.

2.2. Đối tượng nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu của Luận án là bụi $PM_{2.5}$ trong môi trường không khí xung quanh ở khu vực thành phố Biên Hòa, tỉnh Đồng Nai.

2.3. Phạm vi nghiên cứu

- *Phạm vi địa lý:* Khu vực nghiên cứu được thực hiện trên địa bàn thành phố Biên Hòa, tỉnh Đồng Nai.
- *Phạm vi thời gian:* Thời gian nghiên cứu của Luận án được thực hiện từ 2020 đến 2024.
- *Phạm vi đặc tính hóa học của $PM_{2.5}$:* Luận án tập trung xác định thành phần hóa học, bao gồm các nguyên tố và ions có trong bụi $PM_{2.5}$ trong môi trường không khí xung quanh ở khu vực thành phố Biên Hòa, tỉnh Đồng Nai.

3. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài

Luận án đã hoàn thiện, bổ sung cơ sở khoa học cho việc xác định mức độ ô nhiễm của bụi $PM_{2.5}$, thành phần vật lý, tính chất hóa học và góp phần đóng góp định danh nguồn thải vào nồng độ bụi $PM_{2.5}$ trong môi trường không khí. Ngoài ra luận án đã tính toán và đưa ra được cảnh báo ảnh hưởng của bụi $PM_{2.5}$ đối với sức khỏe con người đang sinh sống trên địa bàn khu vực nghiên cứu. Qua đó, luận án đã góp phần

vào việc triển khai nghiên cứu toàn diện hơn đối với bụi $PM_{2.5}$ trong môi trường không khí, góp phần hoạch định chính sách quản lý, nâng cao CLKK sạch tại khu vực thành phố Biên Hòa, tỉnh Đồng Nai.

4. Các đóng góp mới của luận án

Kết quả nghiên cứu của Luận án “*Nghiên cứu diễn biến và đặc điểm của bụi mịn trong môi trường không khí tại khu vực Biên Hòa - Tỉnh Đồng Nai*” được hoàn thành với một số đóng góp mới như sau:

- Luận án đã ứng dụng thành công kính hiển vi điện tử quét (Scanning Electron Microscopy - SEM) để mô tả đặc trưng hình thái và kích thước của các hạt trong bụi mịn $PM_{2.5}$.
- Phân tích được đặc trưng về thành phần hóa học của bụi $PM_{2.5}$ để ứng dụng thành công công cụ mô hình hóa (*HYSPLIT, PMF*) nhằm mô phỏng quỹ đạo di chuyển và xác định cụ thể các nguồn đóng góp lượng bụi $PM_{2.5}$ đến CLKK khu vực thành phố Biên Hòa, tỉnh Đồng Nai.

5. Bố cục của luận án

Luận án bao gồm 156 trang, 15 bảng, 48 hình, 194 tài liệu tham khảo và 12 Trang phụ lục. Bố cục của Luận án bao gồm 3 chương (*không kể phần mở đầu, kết luận và kiến nghị, tài liệu tham khảo và phụ lục*); Cụ thể: **Chương 1:** Trình bày tổng quan chung về hiện trạng ô nhiễm không khí bởi bụi $PM_{2.5}$ đã được nghiên cứu ở trong và ngoài nước, các đặc trưng về hóa-lý của bụi $PM_{2.5}$; **Chương 2:** Trình bày các phương pháp nghiên cứu được sử dụng để hoàn thành nội dung Luận án; và **Chương 3:** Kết quả nghiên cứu đã được thực hiện của Luận án.

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU

1.1. Tổng quan về hiện trạng và các đặc trưng của bụi PM_{2.5}

1.1.1. Định nghĩa và tính chất cơ bản của bụi PM_{2.5}

Theo WHO và Liên minh Châu Âu (EU), bụi (particulate matter - PM) bao gồm một hỗn hợp của các hạt ở thể rắn và thể lỏng lơ lửng ở trong không khí. PM rất phổ biến trong môi trường, được xem là một chất gây ÔNKK trên diện rộng, nhiều đặc tính hóa-lý cần được nghiên cứu thêm. Bụi PM được phân loại dựa trên đặc tính cơ học và sự ảnh hưởng tới sức khỏe của chúng và được phân ra làm hai loại bụi PM chính như sau: bụi PM₁₀ là những hạt bụi có đường kính khí động học nhỏ hơn 10 μm và bụi PM_{2.5} còn được gọi là bụi mịn, bao gồm các hạt vật chất có đường kính khí động học nhỏ hơn hoặc bằng 2.5 micromet. Chúng chủ yếu sinh ra từ quá trình đốt cháy nhiên liệu như củi, gỗ, than đá, dầu và các hoạt động công nghiệp, giao thông [128].

Bụi PM hay còn gọi là vật chất hạt trong không khí, là một hỗn hợp phức tạp gồm các hạt rắn và giọt lỏng có kích thước siêu nhỏ, tồn tại dưới dạng sol khí trong khí quyển. Thành phần hóa học chung của bụi PM bao gồm: sunfat, nitrat, amoni; các ion vô cơ khác như các ion natri, kali, canxi, magiê và clorua, carbon hữu cơ và nguyên tố, chất liệu cấu tạo nên vỏ trái đất, kim loại (bao gồm cả cadmium, đồng, niken, vanadi, kẽm) và polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH). Ngoài ra, các thành phần sinh học như chất gây dị ứng và các nhóm sinh vật đặc biệt là vi - rút được tìm thấy trong các mẫu bụi [129].

Theo Cơ quan Bảo vệ Môi trường Hoa Kỳ (US. EPA), bụi PM còn được gọi là vật chất hạt ô nhiễm, là một hỗn hợp phức tạp gồm các hạt rắn và giọt lỏng siêu nhỏ, tồn tại trong khí quyển dưới dạng sol khí. US. EPA đã cảnh báo và quan tâm nghiên cứu về bụi PM được đặc biệt quan tâm là PM_{2.5} bởi vì với đặc tính vô cùng nhỏ nên chúng có khả năng đi sâu vào cuống họng và trong phổi của con người. Khi đã hít phải bụi PM_{2.5} chúng có thể gây ảnh hưởng tới chức năng của tim và phổi [129, 158].

Hạt ô nhiễm được hình thành bởi một số thành phần bao gồm axit (như nitrat và sulfat), chất hữu cơ, kim loại và các hạt đất hoặc bụi vật liệu.

Theo Tổng cục Môi trường - Bộ Tài nguyên và Môi trường Việt Nam [8]:

Bụi là tên chung cho các hạt chất rắn và hạt lỏng có đường kính nhỏ cỡ vài micrômét đến nửa milimét, tự lắng xuống theo trọng lượng của chúng nhưng vẫn có thể lơ lửng trong không khí một thời gian:

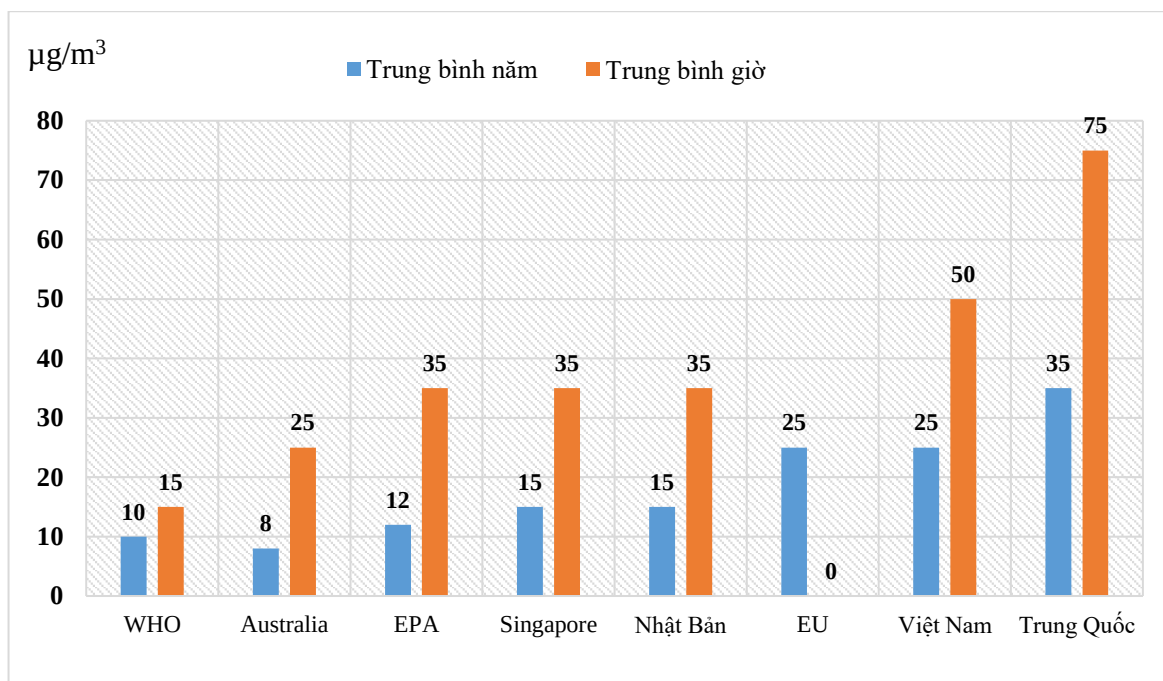
- Bụi lơ lửng tổng số (TSP): là các hạt bụi có đường kính khí động học nhỏ hơn hoặc bằng $100\mu\text{m}$.
- Bụi PM_{10} : là các hạt bụi có đường kính khí động học nhỏ hơn hoặc bằng $10\mu\text{m}$.
- Bụi $\text{PM}_{2.5}$: là các hạt bụi có đường kính khí động học nhỏ hơn hoặc bằng $2,5\mu\text{m}$.
- Bụi $\text{PM}_{1.0}$: là các hạt bụi có đường kính khí động học nhỏ hơn hoặc bằng $1\mu\text{m}$.
- Bụi $\text{PM}_{0.5}$: là các hạt bụi có đường kính khí động học nhỏ hơn hoặc bằng $0,5\mu\text{m}$.
- Bụi $\text{PM}_{0.1}$: là các hạt bụi có đường kính khí động học nhỏ hơn hoặc bằng $0,1\mu\text{m}$.



Hình 1. 1: Kích thước các loại bụi mịn

Trong quản lý nhà nước về môi trường, nồng độ bụi $\text{PM}_{2.5}$ trong không khí được quản lý, đánh giá bằng các giá trị nồng độ tối đa cho phép trong Quy chuẩn quốc gia Việt Nam. Quy định về các giá trị giới hạn nồng độ bụi (trung bình giờ và trung bình năm) trong KKXQ của thế giới và Việt Nam được trình bày trong Hình 1.2. Quy định

về giới hạn nồng độ bụi $PM_{2.5}$ ở Việt Nam chỉ thấp hơn Trung Quốc, nhưng cao hơn rất nhiều so với tiêu chuẩn các quốc gia khác, đặc biệt khi so sánh với giá trị khuyến cáo của WHO.

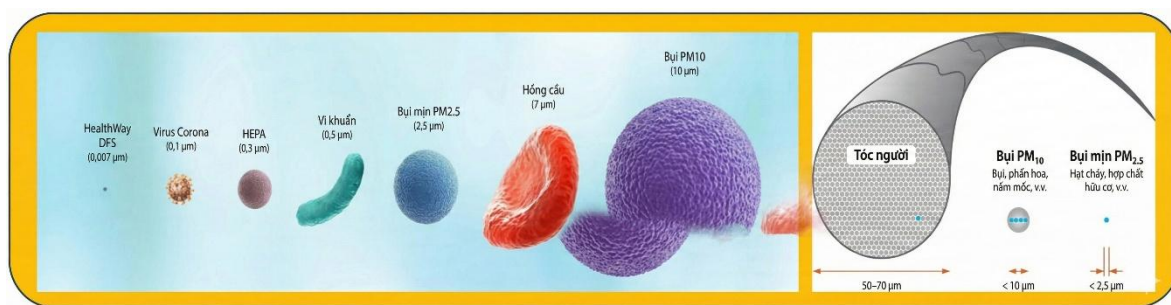


Hình 1.2: Quy định về giới hạn nồng độ bụi $PM_{2.5}$ ở Việt Nam, một số quốc gia và các tổ chức khác trên thế giới

Trong các nghiên cứu khoa học và chương trình quản lý nhà nước về môi trường nói chung, CLKK nói riêng, sáu thông số cơ bản bao gồm: bụi (TSP, PM_{10} và $PM_{2.5}$), CO, SO_2 , NO_2 , O_3 và Pb thường được sử dụng để đánh giá CLKKXQ. Trong đó, bụi $PM_{2.5}$ luôn là thông số quan trọng được quan tâm và chú trọng nhất, do các hạt bụi này có kích thước rất nhỏ nên chúng có khả năng di chuyển rất xa nguồn phát thải theo quỹ đạo rất phức tạp dựa trên các điều kiện khí tượng, địa hình khác nhau [33]. Gần đây, các nghiên cứu cho thấy độc tính của chúng phụ thuộc nhiều vào tính chất lý - hóa của hạt [32, 58]. Vì kích thước của chúng nhỏ nên khó phát hiện bằng mắt thường mà cần sử dụng công cụ phụ trợ như kính hiển vi để phóng đại hình ảnh mới có thể nhận biết được [42, 128]. Sự đa dạng về các đặc tính hình thái, kết cấu, kích thước và thành phần hóa học của hạt trong không khí phụ thuộc chặt chẽ vào quá trình hình thành và các quá trình phát triển của chúng trong khí quyển. Kích thước

hạt đóng vai trò quan trọng trong việc quyết định các đặc tính vật lý, hóa học cũng như sự biến đổi, vận chuyển. Hạt càng nhỏ, diện tích bề mặt càng lớn, làm tăng khả năng hấp phụ và phản ứng với các chất ô nhiễm khác. Trong khí quyển, chúng có thể trải qua nhiều quá trình như đông tụ, kết tụ, lắng đọng khô hoặc ướt, với tốc độ và cơ chế phụ thuộc chủ yếu vào kích thước. Bụi $PM_{2.5}$ có thể tồn tại trong không khí hàng ngày đến hàng tuần và di chuyển xa do ít chịu tác động của trọng lực, trong khi các hạt lớn hơn có xu hướng lắng đọng nhanh hơn.

Các hạt trong khí quyển có sự khác biệt về kích thước, thành phần và nguồn gốc. Hình 1.3 so sánh tương quan kích thước của hạt bụi $PM_{2.5}$ đối với sợi tóc con người (50 - 70 μm) và các kích thước hạt khác nhau. Đường kính của hạt cát biển vào khoảng 90 μm , lớn hơn gấp 9 lần kích thước hạt bụi PM_{10} , lớn hơn khoảng 40 lần so với kích thước hạt bụi $PM_{2.5}$. Kích thước hạt bụi $PM_{2.5}$ nhỏ hơn 3 lần so với tế bào hồng cầu (khoảng 7 μm) (Hình 1.3).



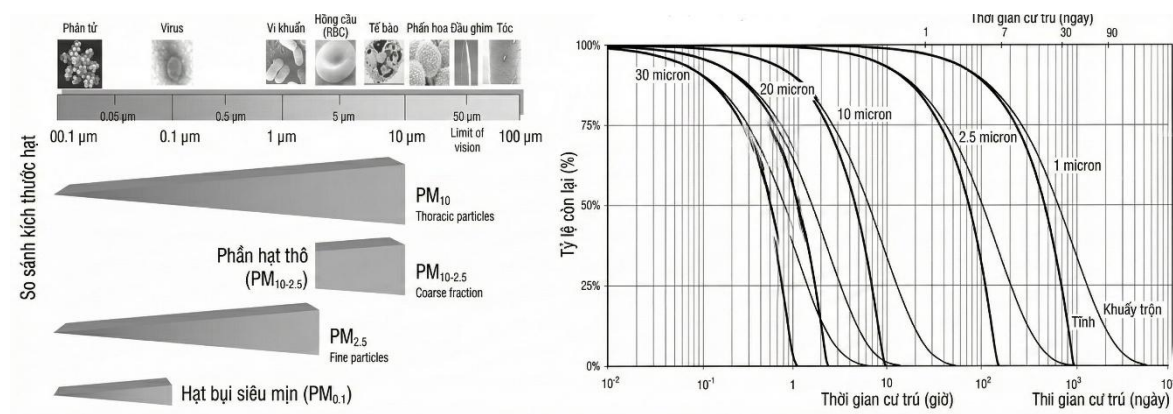
Hình 1.3: Tương quan về kích thước hạt của bụi $PM_{2.5}$ và các thành phần khác

1.1.2. Đặc điểm tính chất vật lý của bụi $PM_{2.5}$

1.1.2.1. Kích thước của $PM_{2.5}$

Bụi $PM_{2.5}$ còn được gọi với tên khác là bụi mịn (*fine particles*). Trong bụi $PM_{2.5}$ được phân ra một loại bụi khác là $PM_{0.1}$ là những hạt bụi có đường kính khí động học nhỏ hơn 0,1 μm hay còn được gọi với tên khác là bụi siêu mịn (*ultrafine particles*). Các hạt có đường kính nhỏ hơn 2,5 μm phần lớn được tạo thành từ pha khí trong môi trường (Hình 1.4a). Các hạt nhỏ nhất là các hạt ở dạng hạt nhân được hình thành từ quá trình ngưng tụ hoặc từ các quá trình phản ứng trong khí quyển và đông tụ là quá trình chính cho sự phát triển của các hạt ở dạng này. Các hạt ở dạng tích tụ là kết quả

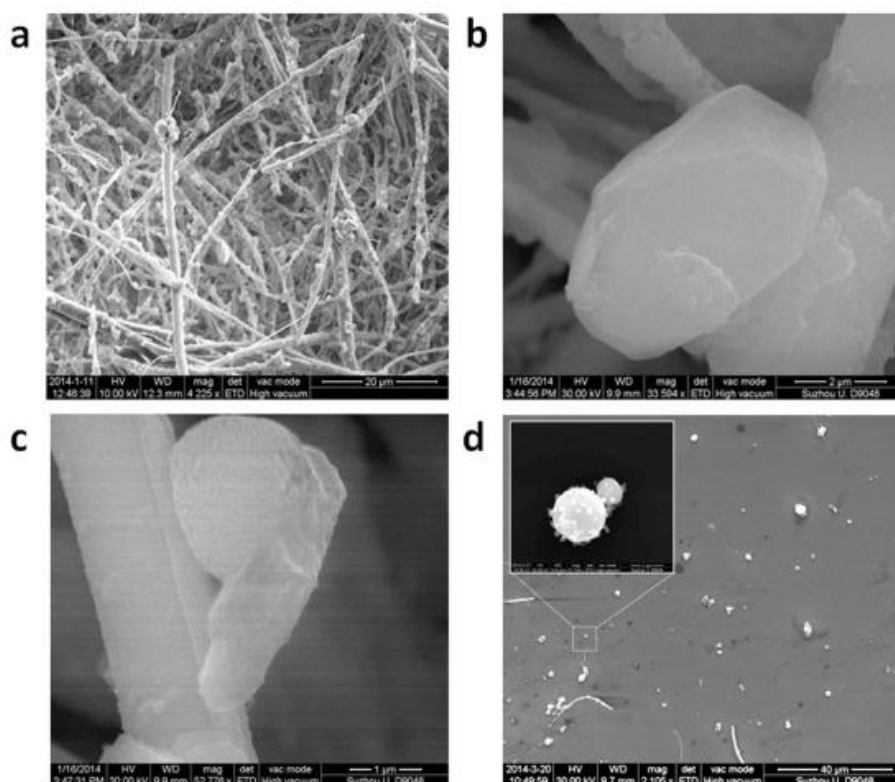
của quá trình phát triển của các hạt ở dạng hạt nhân, các hạt thuộc phạm vi kích thước này ổn định về mặt khí động học, vận tốc lắng đọng thấp cũng như không kết tụ để tạo thành các hạt lớn hơn. Các hạt bụi $PM_{2.5}$ này có thể tồn tại trong môi trường khí quyển từ vài ngày đến vài tuần (Hình 1.4b), do đó chúng chịu sự vận chuyển với một khoảng cách xa và được coi là chất ô nhiễm xuyên biên giới [60].



Hình 1. 4: Mô tả kích thước và thời gian tồn tại của các hạt bụi

1.1.2.2. Hình thái hạt bụi $PM_{2.5}$

Hình dạng của các hạt bụi $PM_{2.5}$ trong môi trường không khí đa phần không đều và không đồng nhất. Chúng có nhiều hình thù khác nhau có thể kể đến là: hình cầu, hình elip, hình thoi, hình tam giác, hình vuông hoặc hình chữ nhật [116] được quan sát rõ dưới kính hiển vi (Hình 1.5). Hình thái của các hạt bụi $PM_{2.5}$ phụ thuộc vào nhiều yếu tố như nguồn gốc, thành phần hóa học và điều kiện môi trường [116]. Hình dạng của hạt có tác động đến đường kính khí động học (hay còn gọi là kích thước hạt) và khả năng khuếch tán của chúng trong khí quyển. Vì vậy hình dạng của hạt cũng là một yếu tố quan trọng trong khả năng vận chuyển các hạt trong không khí, khả năng lắng đọng của hạt trong môi trường và trong cơ thể người.



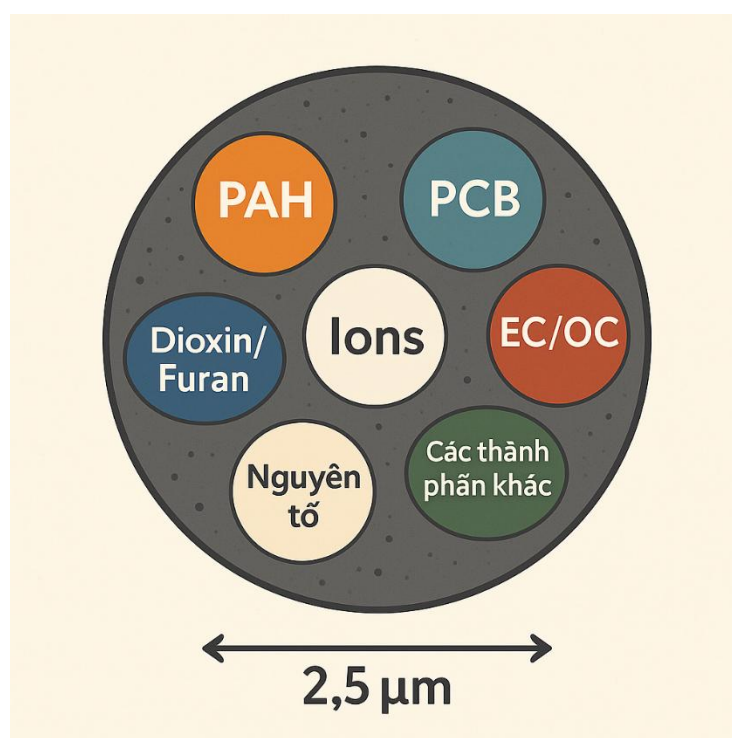
Hình 1. 5: Mô tả hình thái khác nhau của các hạt bụi $PM_{2.5}$

(a) hình ảnh bụi $PM_{2.5}$ bám dính trên sợi giấy lọc, (b) và (c) hình ảnh SEM của bụi $PM_{2.5}$ có bề mặt trên phẳng và nhám tương ứng, (d) Ảnh SEM của $PM_{2.5}$ được thu thập trên đế Silicon [116]

Hình thái của hạt phụ thuộc vào kích thước của chúng, các hạt thường được chia thành 2 hình dạng chính: dạng cầu và dạng vô định; Trong đó, các hạt mịn, có kích thước nhỏ phần lớn được phân bố ở dạng hình cầu chủ yếu đến từ quá trình đốt cháy nhiên liệu, thông qua các phản ứng trong khí quyển [73, 147]. Ngoài các dạng hình cầu, $PM_{2.5}$ còn có các hình dạng khác như hạt dạng bông và dạng hình thon dài. Các hạt thon dài có hình dạng không đều và bề mặt nhẵn là các hạt khoáng chất, các hạt sulfate và nitrate (là các hạt chủ yếu hình thành thứ cấp thông qua các phản ứng hóa học trong khí quyển). Các hạt dạng bông có thể là bồ hóng và các tập hợp bồ hóng từ các quá trình đốt nhiên liệu (than, gỗ, dầu) và khí thải xe cơ giới. Các hạt có dạng hình cầu và dạng bông có khả năng tích tụ các chất ô nhiễm độc hại chẳng hạn như kim loại nặng, các hợp chất hữu cơ dễ bay hơi hay bán bay hơi [152].

1.1.3. Đặc điểm hóa học của bụi $PM_{2.5}$

Thành phần hóa học chính của bụi $PM_{2.5}$ bao gồm chủ yếu ba nhóm chính: các ion vô cơ hòa tan (SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+), thành phần carbon (EC, OC) và các nguyên tố kim loại. Theo nhiều nghiên cứu quốc tế chỉ ra khoảng 80 - 90% khối lượng của bụi $PM_{2.5}$ đã được các nghiên cứu chỉ ra, trong đó sunfate, hợp chất hữu cơ và ammonium thường là các thành phần chiếm tỷ lệ cao nhất [172].



Hình 1. 6: Các thành phần hóa học trong bụi $PM_{2.5}$

Thành phần Carbon: bao gồm carbon nguyên tố (EC) và carbon hữu cơ (OC) của $PM_{2.5}$ là thành phần chủ yếu của các phát thải từ nguồn sơ cấp (quá trình đốt cháy không hoàn toàn). Carbon trong bụi chiếm tỷ lệ khá lớn (20% - 70%) so với khối lượng của bụi $PM_{2.5}$ trong khí quyển [158].

Các nguyên tố kim loại: Nồng độ các nguyên tố kim loại đang dần gia tăng trong khí quyển, đặc biệt trên bụi $PM_{2.5}$ [166]. Các nguyên tố kim loại trong $PM_{2.5}$ có thể được phân loại thành các nguyên tố kim loại nặng và các nguyên tố kim loại là thành phần từ vỏ Trái Đất, bao gồm Si, Al, Ti và Mg chiếm khoảng 20% khối lượng $PM_{2.5}$. Nguồn của các nguyên tố kể trên chủ yếu đến từ tự nhiên như hoạt động của núi lửa,

cháy rừng, thực vật và biển. Các nguyên tố kim loại nặng (Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, As, Cd và Pb) thường chiếm một phần nhỏ (0,5 - 2%) khối lượng PM_{2.5}. Nguồn của các nguyên tố này đến từ việc đốt nhiên liệu hóa thạch và chất thải điện tử, quá trình luyện kim trong công nghiệp, khí thải từ động cơ phương tiện giao thông [178]. Bên cạnh đó, bụi PM_{2.5} còn bao gồm những chất có độc tính cao (chẳng hạn như Pb, Cd và Ni), các thành phần này có độc tính cao và có thể gây đột biến gen và gây ung thư [88].

Các ion vô cơ hòa tan: là một trong những thành phần chính trong bụi PM_{2.5}. Trong số các ion vô cơ hòa tan này, ion sulfate, nitrate và ammonium được xem là các ion chiếm tỷ lệ cao trên bụi PM_{2.5} và được gọi là bụi vô cơ thứ cấp [188]. Các nghiên cứu tại Trung Quốc đã chỉ ra ion hòa tan là thành phần chiếm tỷ lệ cao trong bụi PM_{2.5}. Cụ thể, tại Bắc Kinh nồng độ trung bình của ion hòa tan là 44 µg/m³, chiếm 38% tổng khối lượng PM_{2.5} [173]. Nồng độ trung bình của ion hòa tan là 63,1 ± 35,3 µg/m³, chiếm khoảng 45,3% tổng khối lượng PM_{2.5} ở Hàm Đan [183]. Ở Việt Nam, nồng độ của ion hòa tan là 4,1 ± 1,2 µg/m³, chiếm tỷ lệ 17,8% tổng khối lượng PM_{2.5} tại thành phố Hồ Chí Minh. Kết quả này cho thấy rằng ion hòa tan là một trong những thành phần có tỷ lệ đóng góp tương đối lớn trong bụi PM_{2.5} tại Việt Nam, phản ánh đặc trưng thành phần hóa học phổ biến của loại bụi này trong điều kiện môi trường hiện nay [175].

1.2. Nguồn phát sinh của bụi PM_{2.5}

Bụi PM_{2.5} có thể được thải trực tiếp tại nguồn (sơ cấp) hoặc được hình thành trong khí quyển thông qua các phản ứng hóa học trong khí quyển (thứ cấp) được thải ra từ các quá trình tự nhiên như: núi lửa phun trào, cháy rừng xói mòn đất, bão bụi hoặc từ hoạt động của con người tạo ra trong các quá trình đốt cháy nhiên liệu, công nghiệp nặng, dầu khí, nông nghiệp, giao thông và trong sinh hoạt.

Nguồn tự nhiên: Bụi PM_{2.5} được phát thải từ phun trào núi lửa, cháy rừng, cát bay, ô nhiễm từ đại dương, nấm mốc, phấn hoa, bụi đường. Khi núi lửa phun trào, một lượng lớn tro bụi sẽ phát thải ra không khí. Theo WHO, đường kính của các hạt tro từ núi lửa có kích thước khác nhau phổ biến là 30 - 40 µm, một số có kích thước

dưới $10\text{ }\mu\text{m}$ (PM_{10}) và một số còn nhỏ hơn $2.5\text{ }\mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2.5}$). Cháy rừng cũng là một nguồn tự nhiên phát thải ra bụi $\text{PM}_{2.5}$ do quá trình đốt cháy sinh khối.



Hình 1. 7: Một số nguồn ô nhiễm tự nhiên gây ra bụi $\text{PM}_{2.5}$ vào khí quyển

(a) Phun trào núi lửa, (b) Cháy rừng tự nhiên,
(c) bụi cát ở sa mạc Sahara, (d) bão cát ở Trung Quốc

Nguồn nhân tạo: Các nguồn nhân tạo, hay còn gọi là nguồn nhân sinh, phát sinh bụi $\text{PM}_{2.5}$ do hoạt động của con người gây ra. Dạng nguồn này rất đa dạng như đốt cháy nhiên liệu (xăng, dầu diesel, sinh khối...) để tạo ra năng lượng cung cấp cho các hoạt động sinh hoạt, các ngành công nghiệp (khai thác mỏ, luyện kim, sản xuất hóa chất...), hoạt động giao thông vận tải, các công trình xây dựng. Theo báo cáo hiện trạng môi trường quốc gia năm 2017, các động cơ xe sử dụng diesel phát thải bụi $\text{PM}_{2.5}$ nhiều hơn 7,5 lần so với động cơ sử dụng xăng [86]. Hoạt động giao thông đường bộ không chỉ phát thải từ động cơ mà còn từ bụi đường và ma sát lốp xe [98]. Các ngành công nghiệp khai thác mỏ, luyện kim, sản xuất hóa chất... không chỉ phát sinh ra bụi $\text{PM}_{2.5}$ mà còn tạo ra các hợp chất độc hại cho sức khỏe con người. Hoạt

động xây dựng cũng phát thải ra lượng lớn bụi $PM_{2.5}$ với 11% bụi xây dựng là bụi $PM_{2.5}$. Quá trình đốt cháy sinh khối của con người (nấu ăn bằng củi, đốt rừng làm nương rẫy, sử dụng lò sưởi vào mùa đông,...) tạo ra lượng lớn bụi $PM_{2.5}$. Bên cạnh đó, các hoạt động đốt hử sinh khối (rom rạ, phụ phẩm nông nghiệp) là nguồn phát thải $PM_{2.5}$ quan trọng, đặc biệt là trong các vụ mùa [96]. Ngoài ra, nông nghiệp đặc biệt là phát thải NH_3 , đóng vai trò như tiền chất hình thành $PM_{2.5}$ thứ cấp thông qua các phản ứng tạo hợp chất ammonium như NH_4NO_3 và $(NH_4)_2SO_4$ và cả cơ chế phân tử cũng đã được ghi nhận trong tài liệu giải thích khí NH_3 ô nhiễm [20].

Hoạt động sinh hoạt hàng ngày của con người cũng phát thải ra một lượng lớn bụi $PM_{2.5}$. Đốt nhang, hút thuốc lá có thể phát thải ra các loại bụi có chứa các hợp chất nguy hiểm như: carbonyl, nicotine, CO,... và nhiều hợp chất có thể gây ra ung thư phổi. Nấu ăn cũng là một trong những hoạt động nhân tạo phát sinh bụi $PM_{2.5}$. Nồng độ bụi $PM_{2.5}$ tăng lên khoảng $160 \mu g/m^3$ trong nhà bếp sau 90 phút kể từ lúc bắt đầu nấu ăn và khoảng $60 \mu g/m^3$ trong phòng khách sau thời gian nấu ăn là 60 phút [191]. Ngoài ra, các nghiên cứu còn cho thấy có thể phân loại $PM_{2.5}$ thành hai nguồn trong nhà và ngoài trời. Các nguồn trong nhà không được tạo ra liên tục và chịu tác động lớn bởi nguồn bên ngoài.



Hình 1. 8: Một số nguồn gây ô nhiễm nhân tạo gây ra bụi $PM_{2.5}$ vào khí quyển

Nguồn bên ngoài của bụi $PM_{2.5}$ đến từ rất nhiều nguồn bao gồm cả phát thải trực tiếp và hình thành từ các quá trình phản ứng hóa học trong khí quyển. Những nguồn nhân tạo đến từ các quá trình đốt cháy động cơ của các phương tiện giao thông kém chất lượng, đốt nhiên liệu rắn và công nghiệp (nhà máy điện, lò hơi công nghiệp, lò

đốt, nhà máy hóa dầu). Hay đến từ các nguồn tự nhiên như khói từ các đám cháy rừng, bụi đất do gió thổi từ nông nghiệp và phi nông nghiệp, khí thải sinh học từ thảm thực vật. Nguồn bên ngoài của bụi $PM_{2.5}$ đến từ rất nhiều nguồn bao gồm cả phát thải trực tiếp và hình thành từ các quá trình phản ứng của các tiền chất khí trong khí quyển.

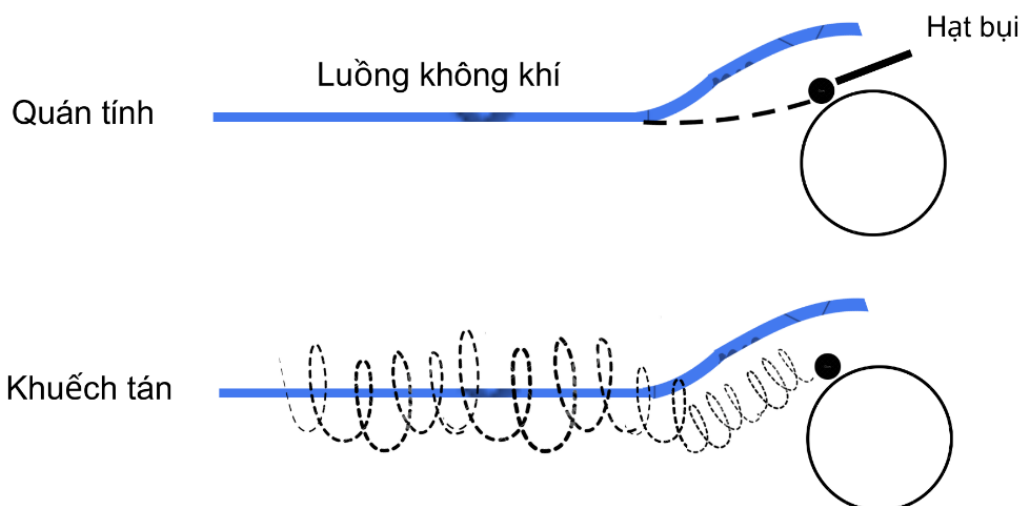
Nồng độ của $PM_{2.5}$ tại các khu vực khác nhau là khác nhau, phụ thuộc vào đặc trưng kinh tế của khu vực, theo như Martins và Graca (2018) nghiên cứu, nồng độ $PM_{2.5}$ ở đô thị trên toàn cầu đến từ 15% công nghệ và sản xuất điện, chủ yếu đến từ một số quốc gia ở Châu Á và Trung Đông. Các quá trình đốt nhiên liệu, sinh khối chiếm 20% và 22% thông qua các phản ứng của tiền chất phát thải từ hoạt động con người (SO_2 , NO_x). Các nguồn từ tự nhiên chiếm 18% tỉ lệ nguồn thải toàn cầu [89].

Các nguồn của $PM_{2.5}$ được thống kê tại một số địa điểm, như tại Đồng bằng Châu Giang thuộc Trung Quốc, $PM_{2.5}$ đến từ sulfate thứ cấp (21%), khí thải xe cộ (14%), khí thải công nghiệp (13%), nitrate thứ cấp (11%), đốt sinh khối (11%), aerosol hữu cơ thứ cấp (SOA, 7%), đốt than đá (6%), bụi khoáng từ đất (fugitive dust) trong điều kiện khô hạn, đất không đủ độ ẩm để duy trì độ kết dính giữa các hạt, thông qua tác động của gió, xe cộ và các hoạt động khác chúng sẽ đi vào khí quyển) (5%), khí thải tàu (3%) và từ muối biển (2%) [59]. Hay tại Quảng Châu, khác với Đồng bằng Châu Giang, nguồn $PM_{2.5}$ phát thải lớn nhất đến từ giao thông (30,6%), và các nguồn còn lại với đốt sinh khối (23,1%), đốt than (17,7%), khí thải tàu biển (14,0%), lò hơi đốt sinh khối (9,9%) và khí thải công nghiệp (4,7%) [76]. Ở Việt Nam, Cohen và cộng sự (2010) đã xác định được nguồn gốc chính đóng góp vào khối lượng bụi $PM_{2.5}$ tại Hà Nội là ô tô và phương tiện giao thông (40%), bụi đất do gió thổi (3,4%), sunfate thứ cấp (7,8%), khói từ quá trình đốt sinh khối (13%), công nghiệp xi măng và sắt (19%), và 17% từ quá trình đốt than đá. Qua đó có thể thấy được khí thải từ giao thông vận tải và đốt sinh khối là các nguồn chính tạo nên bụi $PM_{2.5}$ [32].

1.3. Nguyên lý và phương pháp lấy mẫu bụi $PM_{2.5}$

Các hạt bụi được thu bắt theo 3 cơ chế: thu bắt do va chạm quán tính, do va chạm tiếp xúc và do khuếch tán Brown. Trong đó 2 cơ chế có tần suất và hiệu quả cao hơn là chuyển động quán tính và khuếch tán Brown. Chuyển động quán tính đối với các

hạt có kích thước lớn và hiệu suất thu bụi tăng lên khi tốc độ lọc lớn. Và ngược lại, đối với chuyển động khuếch tán Brown đối với các hạt có kích thước nhỏ và hiệu suất thu bụi tăng lên khi tốc độ lọc chậm.



Hình 1. 9: Hình ảnh quá trình chuyển động của các hạt bụi

Quá trình lấy mẫu $PM_{2.5}$ được thực hiện dựa trên nguyên lý chung là tách kích thước hạt, thu giữ bụi trên màng lọc, kiểm soát lưu lượng dòng khí và phân tích khối lượng hoặc thành phần hóa học của mẫu. Tuy nhiên, tùy theo mục đích nghiên cứu và yêu cầu kỹ thuật, người ta có thể sử dụng các thiết bị lấy mẫu có lưu lượng thấp hoặc lưu lượng lớn.

Trong các thiết bị lấy mẫu lưu lượng thấp (low-volume samplers), luồng khí đi qua hệ thống có lưu lượng thường khoảng 1-5 L/phút. Không khí được hút qua một đầu cắt khí động học hoặc impactor để tách các hạt có kích thước lớn hơn $2.5\ \mu m$, sau đó đi qua màng lọc làm từ PTFE, sợi thủy tinh hoặc thạch anh, nơi $PM_{2.5}$ bị giữ lại. Thiết bị này thường sử dụng bơm hút khí có bộ điều chỉnh lưu lượng để duy trì tốc độ ổn định trong suốt quá trình lấy mẫu. Do lưu lượng thấp, các thiết bị này thường được sử dụng cho các nghiên cứu môi trường dài hạn, đánh giá chất lượng không khí nền hoặc trong điều kiện cần bảo tồn mẫu để phân tích chi tiết thành phần hóa học như kim loại nặng, hợp chất hữu cơ, ion hoặc dioxin/furan.

Ngược lại, các thiết bị lấy mẫu lưu lượng lớn (high-volume samplers) hoạt động ở lưu lượng cao hơn, thường trong khoảng 1000-1500 L/phút. Nguyên lý lấy mẫu tương tự, nhưng do lưu lượng lớn, thiết bị sử dụng bộ lọc có diện tích lớn hơn (thường là màng sợi thủy tinh hoặc thạch anh với kích thước khoảng 20 x 25 cm) để thu giữ đủ lượng bụi trong thời gian ngắn hơn. Các hệ thống này thường được sử dụng để nghiên cứu ÔNKK trong khu vực có nồng độ bụi cao, đánh giá tác động của các nguồn phát thải lớn (như giao thông, công nghiệp) hoặc thu thập mẫu đủ lớn để phân tích chuyên sâu thành phần hóa học

Ngoài ra còn có phương pháp dựa trên nguyên tắc phân tích sự giảm dần tia beta với nguyên lý là mỗi giờ một thành phần cacbon (C^{14}) phát ra một nguồn liên tục các tia beta (electron năng lượng cao) qua một màng lọc. Các tia beta sẽ được phát hiện và được đếm bởi thiết bị đặc biệt. Bể lọc được dịch chuyển đến nơi thu mẫu, bơm hút sẽ hút một lượng khí chứa bụi xác định. Mỗi giờ, bể lọc chứa bụi được đặt giữa nguồn tia beta và thiết bị đo gây ra sự tắt dần tia beta [35].

1.4. Các yếu tố ảnh hưởng đến nồng độ bụi $PM_{2.5}$ trong môi trường không khí

Nồng độ chất ô nhiễm không chỉ phụ thuộc vào đặc điểm của nguồn (lượng phát thải, thành phần chất ô nhiễm, ...) mà còn chịu sự chi phối mạnh mẽ của các yếu tố môi trường. Đối với $PM_{2.5}$, ngoài tốc độ gió và nhiệt độ, các yếu tố chiều cao lớp hòa trộn đối lưu (PBL) và áp suất bề mặt cũng có vai trò quan trọng. Các yếu tố trên tác động đến nồng độ $PM_{2.5}$ thông qua cả quá trình vật lý và hóa học của hạt trong khí quyển [31, 156]. Bên cạnh đó, mối tương quan giữa các yếu tố khí tượng và nồng độ của bụi $PM_{2.5}$ còn phụ thuộc vào sự thay đổi theo mùa và sự khác nhau giữa các vùng, khu vực [148].

1.4.1. Độ ẩm

Độ ẩm trong không khí thấp do khả năng hút ẩm của các sol khí, khi độ ẩm đủ cao các hạt thông qua quá trình tích tụ hơi nước để phát triển, đến khi quá nặng để lơ lửng, các hạt sẽ dựa theo cơ chế lắng đọng khô bị loại bỏ khỏi khí quyển. Độ ẩm cao dẫn đến mưa cũng làm giảm đáng kể nồng độ của $PM_{2.5}$ trong không khí [135]. Tuy nhiên độ ẩm không tương quan đồng nhất với nồng độ của $PM_{2.5}$ vì sự thay đổi không

nhất quán giữa các thành phần của $PM_{2.5}$ khi độ ẩm thay đổi. Nghiên cứu của các nhà khoa học cho thấy khi độ ẩm tăng sẽ làm tăng nồng độ của nitrat và sunfat nhưng lại làm giảm nồng độ của carbon hữu cơ và carbon nguyên tố [67, 89].

1.4.2. Nhiệt độ

Cũng giống như độ ẩm, nhiệt độ cũng không có mối tương quan đồng nhất với bụi $PM_{2.5}$. Martins cho rằng $PM_{2.5}$ có mối tương quan thuận chặt chẽ với nhiệt độ do nhiệt độ ảnh hưởng trực tiếp đến quá trình chuyển hóa của các chất trong khí quyển, khi nhiệt độ tăng thúc đẩy quá trình phản ứng quang hóa thứ cấp tạo hạt [89]. Trong khi đó Chen và cộng sự lại cho thấy được sự tương quan với nồng độ bụi $PM_{2.5}$ là mối quan hệ tương quan nghịch vì khi nhiệt độ cao cũng có thể thúc đẩy sự đối lưu của không khí, tăng khả năng khuếch tán và pha loãng làm giảm nồng độ $PM_{2.5}$ trong khí quyển [31]. Vấn đề nhiệt độ ảnh hưởng đến nồng độ $PM_{2.5}$ trong không khí thường liên quan đến hiện tượng nghịch nhiệt. Hiện tượng này xảy ra khi nhiệt độ của lớp khí quyển phía trên cao lại lớn hơn nhiệt độ của lớp khí quyển phía dưới. Hiện tượng nghịch nhiệt khi xảy ra đều gây cản trở sự xáo trộn của khí quyển và do đó dẫn đến sự tích tụ các chất ô nhiễm, làm nồng độ các chất ô nhiễm có thể tăng cao, gây ảnh hưởng nghiêm trọng đến chất lượng môi trường và sức khỏe của người dân trong khu vực [10].

1.4.3. Lượng mưa

Mưa là một trong những yếu tố có tác động đến nồng độ $PM_{2.5}$ thông qua việc loại bỏ các hạt lơ lửng qua cơ chế lắng đọng ướt vì khi mưa xuống sẽ các hạt bụi, hoà tan một số khí độc hại và sau đó rơi xuống, làm sạch khí quyển. Bên cạnh đó, nồng độ của hạt vẫn thấp sau khi mưa vì các hạt đã được loại bỏ đáng kể khỏi môi trường khí quyển. Trung bình nồng độ $PM_{2.5}$ giảm 56,3% sau khi mưa [81]. Tuy nhiên, sau khi mưa, nhiệt độ của lớp không khí gần mặt đất thấp hơn nhiệt độ của các lớp không khí phía trên, từ đó có thể dẫn đến hiện tượng nghịch nhiệt dẫn đến hiện tượng này thường xảy ra vào mùa mưa [6].

1.4.4. Tốc độ gió và hướng gió

Tốc độ gió và hướng gió có ảnh hưởng quan trọng đến mức độ ÔNKK. Nhiều nghiên cứu đã cho rằng ảnh hưởng bởi địa hình, vị trí địa lý và điều kiện khí hậu, hướng gió chủ đạo ảnh hưởng đến nồng độ hạt rất khác nhau ở các vùng khác nhau. Các hiện tượng mang chất ô nhiễm xuyên biên giới đều bị ảnh hưởng rất nhiều bởi tốc độ gió [84]. Cũng giống như mưa, gió cũng là những yếu tố làm giảm nồng độ của các chất ô nhiễm được gây ra trên địa bàn nhưng chúng lại đem theo các chất ô nhiễm từ khu vực khác đến, nó tạo ra các dòng khí vận chuyển, pha loãng cũng như phân tán nồng độ của các hạt. Việc phân tán ô nhiễm của gió còn phụ thuộc vào vận tốc gió và hướng gió [148].

1.4.5. Áp suất bề mặt và các yếu tố chiều cao lớp hòa trộn đối lưu (PBL)

Các yếu tố khí tượng có vai trò quan trọng trong việc chi phối sự phát tán và tích tụ bụi mịn $PM_{2.5}$. Trong đó, PBL quyết định không gian phân bố theo phương thẳng đứng của các chất ô nhiễm: khi PBL thấp (thường xảy ra vào ban đêm hoặc mùa đông), không khí bị ổn định và các hạt bụi dễ bị tích tụ gần mặt đất, làm gia tăng nồng độ $PM_{2.5}$; ngược lại, khi PBL cao, các chất ô nhiễm được khuếch tán mạnh hơn và nồng độ bụi mịn có xu hướng giảm. Bên cạnh đó, áp suất bề mặt ảnh hưởng đến sự lưu thông khí quyển và quá trình vận chuyển ngang của các chất ô nhiễm. Áp suất cao thường đi kèm điều kiện thời tiết ổn định, ít gió và hiện tượng nghịch nhiệt, khiến bụi mịn bị giữ lại trong tầng khí quyển thấp; trong khi áp suất thấp thường liên quan đến sự xáo trộn khí quyển, giúp khuếch tán bụi tốt hơn. Như vậy, sự kết hợp của PBL thấp và áp suất cao là điều kiện bất lợi, làm nồng độ $PM_{2.5}$ trong không khí tăng cao [134].

1.4.6. Thảm thực vật

Thảm thực vật thường được coi là một biện pháp hiệu quả để giảm thiểu các vấn đề về CLKKXQ. Lá cây hấp thụ các chất ô nhiễm dạng khí thông qua khí khổng, trong khi các hạt bụi được loại bỏ khỏi không khí nhờ quá trình lắng đọng trên bề mặt lá và cành. Các nghiên cứu khác nhau đã đánh giá bằng thực nghiệm tốc độ lắng đọng

mà tại đó các chất ô nhiễm được hấp thụ bởi thảm thực vật đô thị [131]. Mô phỏng trên máy tính với dữ liệu môi trường địa phương cho thấy rằng cây cối và rừng ở Hoa Kỳ tiếp giáp đã loại bỏ 17,4 triệu tấn ÔNKK trong năm 2010 (khoảng: 9,0 - 23,2 triệu tấn), với ảnh hưởng sức khỏe con người trị giá 6,8 tỷ USD (khoảng: 1,5 - 13 USD) [99]. Việc loại bỏ ô nhiễm này tương đương với việc cải thiện CLKK trung bình dưới 1% [99].

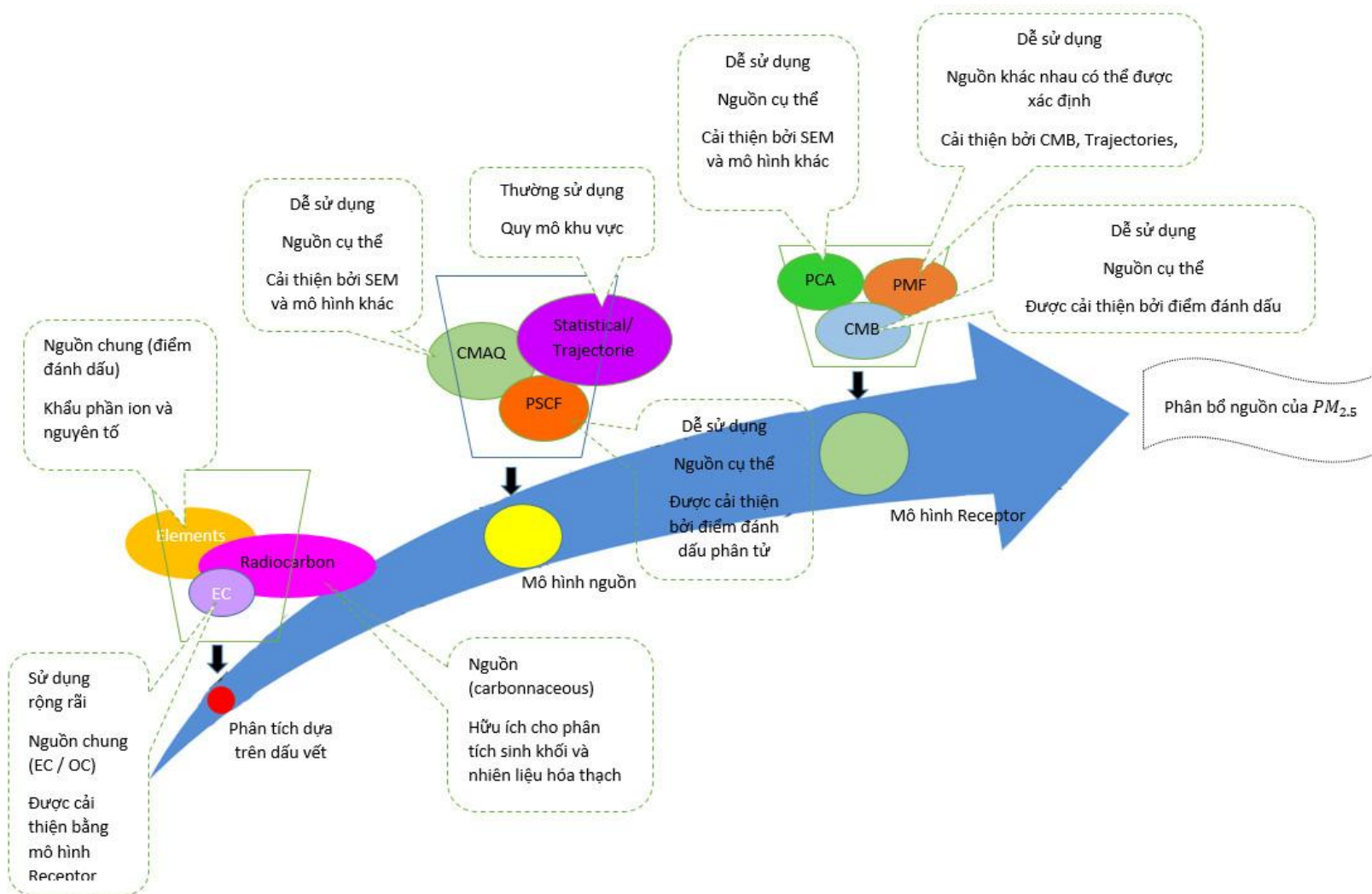
1.4.7. Ảnh hưởng của nhà ở và các công trình xây dựng khác

Trong các KCN, sự chuyển động của không khí cùng với các phân tử bụi và hơi khí chứa trong nó khác với ở vùng trống trải (không có vật cản). Nhà cửa và các công trình sẽ làm thay đổi vận tốc của không khí. Ở phía trên công trình vận tốc chuyển động của không khí tăng lên, phía sau công trình vận tốc không khí giảm xuống và đến khoảng cách xa nào đó vận tốc gió mới đạt tới trị số ban đầu. Ở phía trước công trình, một phần động năng của gió biến thành thế năng và tạo thành áp lực dư. Ở phía sau công trình có hiện tượng gió xoáy và làm loãng không khí tạo ra áp lực âm. Ngoài ra, trong khu vực công nghiệp còn có các dòng khí chuyển động do các nguồn nhiệt gây ra bởi các hoạt động công nghiệp thải ra cũng như các nhiệt bức xạ mặt trời đốt nóng trên các mái nhà, đường sá và sân bãi gây nên sự chênh lệch nhiệt độ và tạo thành sự chuyển động của không khí ảnh hưởng trực tiếp đến sự phân bố các chất ô nhiễm [7].

1.5. Phương pháp xác định nguồn phát sinh bụi PM_{2.5} trong môi trường

Khi nhận thức về những tác động tiêu cực đến sức khỏe và môi trường gia tăng, các nghiên cứu về bụi PM gần đây đã thu hút sự chú ý ngày càng nhiều. Nhiều công trình, đặc biệt là ở khu vực châu Á, đã tập trung nghiên cứu về bụi PM, đặc biệt là PM_{2.5}. Các nghiên cứu này áp dụng nhiều phương pháp khác nhau để xác định nguồn phát thải, chẳng hạn như phân tích tương quan, mô hình tiếp nhận, giải đoán hình ảnh vệ tinh, hoặc phân tích hóa học. Việc nghiên cứu nguồn phát sinh bụi chủ yếu dựa trên việc phân tích sự tương quan giữa các yếu tố, đặc điểm và thành phần hóa học của bụi để đánh giá mức độ đóng góp của các nguồn thải. Tuy nhiên, một số nghiên cứu khác lại sử dụng phương pháp mô hình hóa, áp dụng các phần mềm chuyên dụng

để giải quyết các vấn đề liên quan đến lan truyền và nguồn gốc của hạt bụi. Mỗi phương pháp đều có những ưu điểm và hạn chế riêng. Phần lớn các nghiên cứu trên thế giới nhằm xác định sự đóng góp của các nguồn thải đối với chất lượng không khí (CLKK) đều tuân theo quy trình nhất định, với bước đầu tiên là phân tích thành phần của bụi dựa trên dấu vết, sau đó sử dụng mô hình nguồn và cuối cùng là mô hình tiếp nhận (receptor modeling) để xác định nguồn đóng góp vào bụi (như PMF, CMB...). Cách tiếp cận này thường được thực hiện thông qua mô hình tiếp nhận. Mô hình này thiết lập một tập hợp các nguồn thải và xác định mức độ đóng góp của từng nguồn dựa trên dữ liệu thu thập và hiểu biết về thành phần của nguồn thải. Kết quả là phần trăm đóng góp của các nguồn vào nồng độ chất ô nhiễm. Vì lý do đó, mô hình tiếp nhận được sử dụng rộng rãi trên thế giới để nhận diện nguồn thải bụi trong không khí [153]. Các phương pháp cụ thể được dùng trong các nghiên cứu gần đây được trình bày cụ thể như sau:



Hình 1. 10: Lịch sử phát triển các loại công cụ, mô hình nhận dạng phân bố đóng góp nguồn ÔNKK

1.5.1. Phương pháp đánh giá tương quan

Để xác định và đánh giá sơ bộ các nguồn phát thải chất gây ô nhiễm tại một vị trí cụ thể, ta có thể xem xét mối quan hệ tương quan giữa các cặp chất ô nhiễm. Nếu hai chất ô nhiễm có hệ số tương quan cao, điều đó cho thấy nồng độ của chúng có xu hướng tăng hoặc giảm đồng thời theo thời gian, có thể do chúng xuất phát từ cùng một nguồn phát thải. Ngược lại, các chất ô nhiễm không chung nguồn gốc sẽ có hệ số tương quan thấp. Hệ số tương quan thấp nhất là 0 khi sự biến đổi của các chất ô nhiễm hoàn toàn độc lập nhau. Hệ số tương quan đạt giá trị cao nhất khi tiến đến ± 1 , trong đó 1 là hoàn toàn đồng biến và -1 là hoàn toàn nghịch biến. Phương pháp này thường được kết hợp với các phương pháp khác như phân tích nhân tố chính hoặc phân tích thành phần hóa học để có cái nhìn toàn diện hơn về các nguồn gây ô nhiễm.

Các thành phần có cùng nguồn gốc phát thải sẽ có mối tương quan với nhau. Các kim loại Al, Fe, Ti, Mn là thành phần chính của lớp vỏ trái đất [187]. Nồng độ các kim loại này trong bụi thường có mối tương quan tốt với nhau. Nhiều nghiên cứu cho thấy V và Ni có mối tương quan tốt với nhau cho thấy nguồn thải có nguồn gốc từ việc sử dụng nhiên liệu dầu nặng HFO [19, 130, 171]. Tại Việt Nam, việc sử dụng dầu FO trong vận chuyển cảng tàu đã ảnh hưởng và đóng góp phát thải hàm lượng V, Ni ở Hà Nội và TP. Hồ Chí Minh [171].

Nghiên cứu của Shujun Bie và cộng sự (2020) [22] đã xác định các nguồn tiềm năng cho các mẫu $PM_{2.5}$ thu thập được ở Thanh Đảo là tỉnh thuộc Phía Đông của Trung Quốc. Mối tương quan đáng kể giữa V và Ni ở cả hai vị trí lấy mẫu cho thấy rằng khí thải vận chuyển có tác động đáng kể đến cảng và khu vực nền ven biển. Ngoài ra, Ni và các kim loại khác cho thấy mối tương quan đáng kể tại địa điểm khu vực nền ven biển, có nghĩa là Ni cũng phát thải từ dầu trên đất liền. Các nguồn chính cũng được xác định là đốt than, khí thải công nghiệp/bụi khoáng, chất thải từ tàu biển, sol khí thứ cấp/đốt sinh khối, muối biển/khí thải từ lớp vỏ, và khí thải của xe, tương ứng. Khí thải từ tàu biển, các hoạt động trên biển cũng được coi là các nguồn tiềm năng và là nguồn chính của $PM_{2.5}$ ở Thanh Đảo trong các giai đoạn lấy mẫu.

1.5.2. Phương pháp phân tích thành phần chính

Phương pháp phân tích thành phần chính được Karl Pearson giới thiệu vào năm 1901 như một dạng tương tự của định lý trục chính trong cơ học [68]. Sau đó, Harold Hotelling đã phát triển nó độc lập và đặt tên vào những năm 1930, từ đó phương pháp này đã được áp dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực dưới các tên gọi khác nhau. Trong các nghiên cứu hiện đại về nhận diện nguồn phát thải trong không khí, phương pháp phân tích thành phần chính (Principal Component Analysis - PCA) hoặc phân tích nhân tố theo thành phần chính (Principal Component Factor Analysis - PCFA) thường được ưa chuộng. Đây là một phương pháp dựa trên số liệu thống kê và được sử dụng trong nhiều lĩnh vực, bao gồm cả quản lý ÔNMT. PCA giúp đơn giản hóa các mối quan hệ phức tạp giữa các biến có liên quan bằng cách giảm dữ liệu, dựa trên các thành phần có chung nguồn gốc phát thải. Trong lĩnh vực môi trường, PCA thường được dùng để xác định các nguồn phát thải chính của chất ô nhiễm thông qua việc phân tích mối liên hệ giữa các thành phần hóa học. Số lượng yếu tố được chọn lọc từ nhiều biến, và tải trọng của từng yếu tố được tính toán để xác định mức độ đóng góp của chúng.

K.F. Ho và cộng sự (2002) đã thu thập mẫu sol khí $PM_{2.5}$ tại hai vị trí khác nhau ở Hồng Kông. Chương trình quan trắc $PM_{2.5}$ được triển khai tại hai trạm quan trắc đô thị trong hai giai đoạn: từ tháng 11 năm 2000 đến tháng 2 năm 2001 và từ tháng 6 đến tháng 8 năm 2001. Các kết quả sau khi phân tích đã được sử dụng mô hình thành phần chính (PCA) xác định để phân bổ nguồn nhằm xác định các nguồn có thể có của $PM_{2.5}$ và để xác định các nguồn chính đóng góp của chúng. Sáu yếu tố tại mỗi địa điểm được phân lập bằng cách sử dụng PCA. Các nguồn đã được tìm thấy và định danh bao gồm: vật chất vỏ, khí thải ô tô, khí thải diesel, sol khí thứ cấp, độ mòn của lốp xe và nhà máy luyện kim loại màu [53].

Trong nghiên cứu về mức độ các kim loại trong đô thị đối với $PM_{2.5}$ và PM_{10} ở vùng Cantabria (Bắc Tây Ban Nha) đã sử dụng kỹ thuật PCA để phân tích thành phần chính đã chứng minh rằng các nguồn phát thải cục bộ của các kim loại trong hạt bụi tại thành phố Santander là quan trọng nhất và khu vực đô thị được phát hiện là nguyên

nhân chính gây ra PM_{10} [16]. Cũng trong một nghiên cứu ở Châu Âu tương tự của G.Lonati và cộng sự (2007) trong một nghiên cứu về bụi $PM_{2.5}$ ở Milan (Ý) đã sử dụng PCA cho thấy nguồn gốc chính phổ biến của OC (cacbon hữu cơ). Vào mùa ấm, OC chủ yếu là nguồn gốc thứ cấp, chất hữu cơ dạng hạt và 25 - 28% khối lượng $PM_{2.5}$ được cảnh báo bởi sự phát thải do hoạt động đốt gỗ để sưởi ấm. Khí thải từ hoạt động giao thông được đánh giá là một trong những nguồn chính làm gia tăng nồng độ $PM_{2.5}$ trong môi trường không khí. EC (cacbon nguyên tố) và chất hữu cơ chính từ giao thông chiếm 30% vào mùa ấm và 7% vào mùa lạnh. Tương ứng với khoảng 10% và 6% khối lượng $PM_{2.5}$ [85]. Cũng sử dụng mô hình PCA, các nghiên cứu đã xác định tỷ lệ đóng góp nguồn $PM_{2.5}$ tại một số thành phố ở châu Âu như sau: tại Amsterdam (Hà Lan), các nguồn chính bao gồm giao thông (30%), hạt thứ cấp (34%), vật liệu vỏ trái đất (7%), quá trình đốt dầu (11%), hoạt động đốt và công nghiệp (9%) và muối biển (2%). Ở Erfurt (Đức), bốn nhóm nguồn được trích xuất gồm khí thải đốt cháy liên quan đến giao thông (32%), PM thứ cấp (32%), vật liệu vỏ trái đất (21%), quy trình công nghiệp (8%), cùng với 3% chưa xác định. Tại Helsinki (Phần Lan), khoảng 80% $PM_{2.5}$ được cho là đến từ ÔNKK xuyên biên giới, bên cạnh đó là các hạt phát sinh từ hoạt động giao thông và các nguồn đốt trong khu vực [130].

Bùi Thị Hiếu và cộng sự (2022) [24] trong nghiên cứu về bụi PM_{10} trong các KCN, giao thông và dân cư ở Bắc Giang sử dụng PCA kết quả cho thấy các nguồn đã ảnh hưởng đến CLKK khu vực bao gồm giao thông, công nghiệp, sử dụng thuốc trừ sâu và đốt than đã được xác định.

Qua các nghiên cứu trên thế giới cho thấy phương pháp PCA được sử dụng khá phổ biến so với các dạng mô hình khác vào những năm 2000 khi các mô hình khác vẫn còn nhiều hạn chế và chưa phát triển như ngày nay (phương pháp chỉ được ưu tiên sử dụng trong các nghiên cứu tại châu Âu trong những năm 2000) bởi sử dụng đơn giản và có nhiều phần mềm có khả năng tính toán được theo phương pháp này. Tuy nhiên, PCA còn tồn tại nhiều nhược điểm đối với việc phân tích đối với các thành phần trong môi trường như sau:

- Phân tích các yếu tố môi trường bằng phương pháp này có thể tạo ra các kết quả âm (điều này không đúng với việc phân tích trong môi trường).
- Dữ liệu đầu vào yêu cầu cho phương pháp này có thể gây ra sai số trong quá trình phân tích.
- PCA đòi hỏi sử dụng phép quay mở rộng, nhưng các kỹ thuật quay tối ưu vẫn chưa được xác định rõ ràng [102].
- PCA không thể xử lý các dữ liệu đo lường nằm dưới giới hạn phát hiện trong quá trình phân tích [55].

Từ đó có thể thấy, phương pháp phân tích thành phần chính trong môi trường đã bộc lộ nhiều hạn chế và yếu điểm. Vì lý do này, phương pháp PCA không được lựa chọn cho nghiên cứu này. Để khắc phục những nhược điểm của PCA, một mô hình cải tiến từ các mô hình trước đây, được sử dụng rộng rãi trong các nghiên cứu trong và ngoài nước, đã được áp dụng. Mô hình này được gọi là Mô hình Nhân tố Hóa Ma trận Dương (PMF) và phương pháp này sẽ được trình bày chi tiết ở mục 1.5.3.

1.5.3. Phương pháp mô hình hóa

Việc sử dụng mô hình để kiểm soát CLKK đã mang lại kết quả nhanh chóng và hiệu quả, đặc biệt khi các thiết bị đo đạc môi trường không khí còn gặp nhiều hạn chế. Trong những năm gần đây, các mô hình tính toán sự phát tán chất ÔNKK đã phát triển mạnh mẽ trên toàn cầu, được cải tiến và hoàn thiện phù hợp với điều kiện từng quốc gia. Điều này là do các yếu tố khí tượng đóng vai trò then chốt trong việc mô hình hóa, giúp tính toán và dự báo khả năng lan truyền của các chất ô nhiễm. Đồng thời, phương pháp này thường được thực hiện thông qua mô hình nơi tiếp nhận, trong đó thiết lập một tập hợp các nguồn thải và đánh giá mức độ đóng góp của chúng dựa trên dữ liệu đo đạc cùng kiến thức về thành phần nguồn thải. Kết quả đầu ra là tỷ lệ phần trăm đóng góp của các nguồn thải vào nồng độ chất ô nhiễm, cung cấp thông tin hữu ích cho các nhà quản lý trong quá trình xây dựng và quy hoạch để đảm bảo chất lượng không khí trong quá trình phát triển địa phương. Nhờ tính hiệu quả cao, mô hình nơi tiếp nhận đã trở nên phổ biến trên toàn thế giới trong việc xác định các nguồn ô nhiễm tiềm năng và nhận diện các chất thải trong không khí.

- *Mô hình HYSPLIT (Hybrid Single - Particle Lagrangian Integrated Trajectories)*

Mô hình HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectories) là một công cụ quan trọng do Cục Quản lý Khí quyển và Đại dương Quốc gia Hoa Kỳ (NOAA) phát triển để mô phỏng sự vận chuyển, khuếch tán và lắng đọng của các chất ô nhiễm trong khí quyển. Mô hình này ra đời từ năm 1949 và được cập nhật nhiều lần, với phiên bản mới nhất vào năm 2015. Với nguyên lý hoạt động linh hoạt, HYSPLIT có nhiều ứng dụng quan trọng trong nghiên cứu chất lượng không khí. Một trong những ứng dụng phổ biến nhất là phân tích quỹ đạo ngược, giúp truy xuất nguồn gốc của các chất ô nhiễm bằng cách theo dõi quỹ đạo di chuyển của khối khí. Phương pháp này đặc biệt hữu ích trong việc xác định các nguồn phát thải bụi mịn $PM_{2.5}$ và các chất ô nhiễm khác, từ đó hỗ trợ xây dựng các chính sách kiểm soát ô nhiễm hiệu quả hơn. Ngoài ra, mô hình còn được sử dụng để mô phỏng và dự báo sự phát tán của các chất ô nhiễm trong khí quyển, bao gồm khói từ cháy rừng, tro núi lửa, chất phóng xạ và các chất ô nhiễm từ nguồn giao thông hoặc công nghiệp. HYSPLIT cũng giúp tính toán quá trình lắng đọng khô và lắng đọng ướt, từ đó đánh giá tác động của các chất ô nhiễm lên môi trường và hệ sinh thái [34].

HYSPLIT hoạt động dựa trên phương pháp tính lai, kết hợp giữa hai phương pháp Lagrangian và Eulerian. Phương pháp Lagrangian theo dõi chuyển động của các phân tử khí hoặc hạt ô nhiễm theo thời gian, mô phỏng quỹ đạo di chuyển của các chất ô nhiễm trong khí quyển. Trong khi đó, phương pháp Eulerian sử dụng lưới ba chiều cố định để tính toán nồng độ chất ô nhiễm tại từng vị trí, giúp xác định sự phát tán và lắng đọng theo thời gian. Nhờ sự kết hợp này, HYSPLIT có thể mô phỏng một cách chính xác cả quỹ đạo vận chuyển khối khí lẫn sự tích lũy và phát tán chất ô nhiễm trong không khí [34].

Nhờ sự kết hợp của hai phương pháp này, HYSPLIT có thể mô phỏng cả sự di chuyển của khối khí lẫn sự tích lũy và phát tán của chất ô nhiễm trong khí quyển một cách chính xác. Ứng dụng của mô hình HYSPLIT Phân tích quỹ đạo ngược là một công cụ quan trọng trong nghiên cứu nguồn gốc của chất ô nhiễm. Bằng cách truy xuất ngược lại quỹ đạo di chuyển của khối khí, HYSPLIT có thể giúp xác định điểm

xuất phát của các chất ô nhiễm, từ đó thiết lập mối quan hệ giữa nguồn phát thải và khu vực bị ảnh hưởng. Ứng dụng này thường được sử dụng để nghiên cứu bụi $PM_{2.5}$ tại các đô thị lớn trên thế giới và tại Việt Nam giúp xác định các khu vực công nghiệp hoặc giao thông có tác động lớn nhất đến chất lượng không khí. Được thể hiện cụ thể qua các nghiên cứu như: nghiên cứu về bụi $PM_{2.5}$ tại Bắc Kinh (2017), Thượng Hải (2015), Lan Châu (2013) - Trung Quốc [72, 82, 157], Gwangju - Hàn Quốc (2008) [71]. Tại Việt Nam, cũng có các nghiên cứu đã sử dụng mô hình này để đánh giá sự vận chuyển tầm xa của các khối không khí đến khu vực nghiên cứu ở của Dương Hữu Huy (2022) tại Hồ Chí Minh [62], Cohen (2010) tại Hà Nội [33].

Mô hình HYSPLIT sở hữu nhiều ưu điểm nổi bật, trong đó có cấu trúc linh hoạt, khả năng mô phỏng đa dạng các quá trình vận hành và trải nền, cùng độ chính xác cao giúp sử dụng biểu tượng dữ liệu chi tiết từ NOAA và các nguồn dữ liệu toàn cầu khác. Ngoài ra, mô hình này dễ sử dụng và có thể chạy trên nền tảng web hoặc phần mềm máy tính, giúp các nhà nghiên cứu dễ dàng tiếp cận và ứng dụng vào các nghiên cứu thực tiễn. Tuy nhiên, HYSPLIT cũng có một số hạn chế, bao gồm sự phụ thuộc vào dữ liệu khí tượng đầu vào, có thể gây sai lệch nếu dữ liệu không đầy đủ hoặc chính xác. Ngoài ra, mô hình này không mô phỏng được các phản ứng hóa học phức tạp trong khí quyển, điều này có thể ảnh hưởng đến việc đánh giá các quá trình biến đổi hóa học của chất ô nhiễm. Dù vậy, với khả năng ứng dụng rộng rãi, HYSPLIT vẫn là một công cụ mạnh mẽ trong nghiên cứu khoa học, quản lý chất lượng không khí và dự báo ÔNMT, góp phần nâng cao hiệu quả kiểm soát ô nhiễm và bảo vệ sức khỏe con người.

- *Mô hình Nghiên cứu và dự báo thời tiết - WRF*

Mô hình Nghiên cứu và dự báo thời tiết - WRF (Weather Research and Forecast) là một hệ thống dự báo thời tiết số được thiết kế cho cả nghiên cứu khí quyển và các ứng dụng dự báo hoạt động. Mô hình này phục vụ nhiều ứng dụng khí tượng trên quy mô hàng chục mét đến hàng nghìn Km. Mô hình được phát triển từ những đặc tính ưu việt nhất của mô hình MM5 với sự cộng tác của nhiều cơ quan tổ chức lớn trên thế giới như Phòng nghiên cứu Khí tượng quy mô vừa và nhỏ của Trung tâm quốc gia

ngiên cứu Khí quyển Hoa Kỳ (NCAR/MMM), Trung tâm quốc gia về dự báo môi trường (NOAA/NCEP), Phòng thí nghiệm phương pháp dự báo (NOAA/FSL), Trung tâm phân tích và dự báo bão của trường đại học Oklahoma (CAPS)...[90]. Trong nghiên cứu, mô hình này có thể tạo ra các mô phỏng dựa trên các điều kiện khí quyển thực tế hoặc các điều kiện lý tưởng hóa. Bởi vậy, mô hình này đã được sử dụng trong các nghiên cứu ở Ấn Độ (2020) [112], khu vực phía đông của Trung Quốc (2016) [159] và ở Thành phố Hồ Chí Minh (2021) [91] và rất nhiều các thành phố khác trên thế giới cũng đã sử dụng mô hình này. Mô hình WRF là mô hình nghiên cứu, dự đoán thời tiết và cũng được sử dụng trong tính toán các chỉ số CLKK từ việc xử lý dữ liệu về địa hình, khí hậu, phát thải bằng rất nhiều các công thức tính toán, phương trình hóa học.

- *Mô hình nơi tiếp nhận*

Lý thuyết cơ bản của tất cả các mô hình nơi tiếp nhận dựa trên nguyên lý bảo toàn khối lượng. Trong mô hình này, giả định rằng dữ liệu về các nguồn thải không thay đổi từ thời điểm phát thải cho đến khi chất ô nhiễm được đo tại điểm tiếp nhận. Nếu không có sự tương tác hay quá trình hình thành hoặc loại bỏ giữa các chất trong khí quyển, tổng khối lượng của một chất ô nhiễm tại điểm tiếp nhận x sẽ là tổng khối lượng từ các nguồn riêng lẻ g_k :

$$x = \sum_{k=1}^p g_k \quad (1.1)$$

Tương tự, nồng độ khối lượng của một chất j sẽ là:

$$x = \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj} \quad (1.2)$$

Trong đó: g_{ik} là tỷ trọng đóng góp vào biến thứ i trong nguồn k ; f_{kj} phần đóng góp của nguồn thứ k vào mẫu thứ j ; x_{ij} là nồng độ của nguyên tố thứ i trong mẫu j

Tùy thuộc vào thông tin yêu cầu về nguồn ô nhiễm, các mô hình nơi tiếp nhận khác nhau sẽ được cân nhắc lựa chọn trong việc nhận dạng và xác định thành phần đóng góp của các dạng nguồn thải chính tới nồng độ bụi trong không khí. Các mô

hình nơi tiếp nhận được sử dụng rộng rãi để nghiên cứu ngày nay đối với CLKKXQ điển hình như:

a, Mô hình cân bằng khối lượng hóa học (CMB)

Mô hình CMB lần đầu tiên được sử dụng bởi Winchester và Nifong (1971), Hidy và Friedlander (1972), và Kniep (1973). Đến năm 1979, mô hình CMB được cải đặt hóa hóa [139] và từ đó đến nay đã trải qua tám lần chỉnh sửa và hoàn thiện. Hiện tại, mô hình được hoàn thiện và cập nhật bởi Viện Nghiên cứu Sa mạc (DRI) thuộc Hệ thống Đại học và Cao đẳng Cộng đồng Nevada, phối hợp với Văn phòng Tiêu chuẩn và Quy mô Chất lượng Không khí của US EPA. Phiên bản mới nhất của model là EPA-CMB 8.2. Trong suốt hai thập kỷ qua, CMB đã trở thành một trong những mô hình thụ hưởng có thể được áp dụng rộng rãi cho các vấn đề liên quan đến chất lượng không khí. Sau này việc ứng dụng mô hình CMB dần được sử dụng rộng rãi hơn để xác định các thành phần đóng góp của các hạt bụi có kích thước nhỏ như PM_{10} và $PM_{2.5}$ như trong các nghiên cứu tại Gwangju - Hàn Quốc (2008) [71], Thành đô - Trung Quốc [122].... Để sử dụng được mô hình thì dữ liệu đầu vào của mô hình CMB bắt buộc phải có dữ liệu các nguồn có khả năng đóng góp và các thông số môi trường xung quanh tương ứng từ các mẫu được phân tích được thu thập tại một vùng nghiên cứu. Chính vì vậy, để sử dụng được mô hình CMB thì cần rất nhiều thông tin về các nguồn thải mà hiện nay ở Việt Nam gần như chưa có thông tin kể trên. Do đó, Việc sử dụng mô hình CMB trong việc nhận dạng và xác định thành phần đóng góp của bụi trong không khí tại khu vực nghiên cứu là không khả thi.

b, Phương pháp phân tích nhân tố ma trận dương (PMF)

Mô hình PMF là một phương pháp thụ thể toán học tiên tiến do US. EPA xây dựng và phát triển, nhằm hỗ trợ nghiên cứu và phân tích nguồn gốc của các chất gây ô nhiễm trong môi trường. Đây là một công cụ khoa học quan trọng giúp cung cấp dữ liệu cho việc xây dựng và thực hiện các tiêu chuẩn CLKK và nước, cũng như hỗ trợ điều tra môi trường. PMF cho phép phân tích nhiều loại dữ liệu môi trường khác nhau, bao gồm trầm tích, nước mặt và KKKXQ, giúp xác định và định lượng các nguồn phát thải của các chất ô nhiễm trong các hệ sinh thái.

Trong các nghiên cứu khoa học, mô hình PMF ngày càng được ứng dụng rộng rãi để phân bổ nguồn gốc các chất ô nhiễm khác nhau, bao gồm bụi mịn $PM_{2.5}$, các chất ô nhiễm hữu cơ khó phân hủy (POP), kim loại nặng, hợp chất hữu cơ dễ bay hơi (VOC) cũng như các cation và anion vô cơ. Theo kết quả tìm kiếm trên Google Scholar năm 2024 với các cụm từ khóa “PMF, $PM_{2.5}$ ” và “CMB, $PM_{2.5}$ ”, có hơn 24.300 công trình nghiên cứu liên quan đến mô hình PMF, trong đó từ năm 2020 – 2024 có đến 16.800 nghiên cứu. Trong khi đó, mô hình CMB (Chemical Mass Balance) chỉ có 6.610 nghiên cứu, chủ yếu tập trung vào giai đoạn trước năm 2010. Điều này cho thấy PMF đang trở thành công cụ phân tích nguồn phát thải phổ biến hơn nhờ khả năng xử lý dữ liệu lớn, độ tin cậy cao và tính ứng dụng rộng rãi trong các nghiên cứu về môi trường khác nhau, chẳng hạn như các chất ô nhiễm hữu cơ khó phân hủy (POP), kim loại nặng, hợp chất hữu cơ dễ bay hơi (VOC) cũng như các cation và anion vô cơ trong thập kỷ qua [118].

Về nguyên lý hoạt động: mô hình PMF sử dụng phương pháp phân tích ma trận không âm, giúp giảm số lượng lớn các biến số trong các bộ dữ liệu phức tạp thành sự kết hợp của các yếu tố nguồn ô nhiễm. Cụ thể, PMF dựa trên nguyên lý phân rã ma trận dữ liệu ô nhiễm thành hai ma trận con, một ma trận biểu diễn hồ sơ nguồn phát thải và một ma trận thể hiện đóng góp của từng nguồn vào mỗi mẫu đo. Không giống như một số phương pháp thống kê khác yêu cầu đầu vào về thông tin hồ sơ nguồn phát thải (như CMB), PMF hoạt động dựa trên dữ liệu thực nghiệm, giúp xác định nguồn ô nhiễm mà không cần giả định trước. Điều này giúp mô hình PMF có độ linh hoạt cao, phù hợp để phân tích các nguồn ô nhiễm không rõ ràng hoặc có sự chồng lấn giữa các loại nguồn

Hiện nay, mô hình đã và đang được rất nhiều các nhà khoa học sử dụng để đánh giá và xác định nguồn thải đóng góp vào nồng độ các hạt bụi PM_{10} và $PM_{2.5}$ đối với môi trường không khí trong thời gian gần đây như trong nghiên cứu về vùng sa mạc khô cằn phía tây bắc Trung Quốc (2022) [83], Delhi - Ấn Độ (2019) [41], Seoul - Hàn Quốc và Bắc Kinh - Trung Quốc (2022) [106], thủ đô Krakow - Ba Lan (2020) [114]... và còn rất nhiều nghiên cứu khác trong thời gian gần đây được sử dụng ở rất

nhiều các thành phố lớn khác nhau điều đó cho thấy sự hiệu quả của mô hình PMF trong việc xác định các nguồn thải đóng góp đến nồng độ bụi. Bên cạnh đó mô hình này không cần bộ hồ sơ nguồn thải như mô hình CMB và có thể đưa ra các kết quả hợp lý hơn PCA.

Do tính hữu ích của mô hình nên đã được ứng dụng trong nhiều nghiên cứu tại Việt Nam, điển hình như tiến trình Đá và cộng sự (2017) [11] Cohen và cộng sự (2010) [32]. Mặc dù số lượng các nghiên cứu sử dụng PMF còn hạn chế, nhưng nó vẫn là mô hình được sử dụng nhiều nhất trong số mô hình nơi tiếp nhận tại Việt Nam. Mô hình này được lựa chọn nhờ một số ưu điểm nổi bật, trong đó quan trọng nhất là không yêu cầu bộ nguồn dữ liệu xung quanh như mô hình CMB. Các thuật toán được sử dụng trong Mô hình PMF đã được các nhà khoa học quản lý chất lượng nước và không khí hàng đầu đánh giá cao là đưa vào sử dụng trong các nghiên cứu gần đây. PMF không dựa vào ma trận trung gian nhưng đã tận dụng được phương pháp bình phương tối thiểu từng điểm. Bởi vậy, dữ liệu được tạo ra có thể được so sánh trực tiếp với ma trận đầu vào mà không cần thay đổi. Đây là cải tiến đặc biệt của PMF so với PCA [35]. PMF sử dụng phương pháp trọng số từng điểm nên cho phép có cả dữ liệu không chắc chắn như: dữ liệu khuyết (MV) hay dữ liệu dưới giới hạn phát hiện (BDL) bằng cách cho chúng trọng số thấp hơn. Thêm vào đó, ràng buộc không âm cũng đã được tích hợp trong quá trình tính toán. Những đặc tính như vậy giúp cho mô hình nơi tiếp nhận phù hợp với các dữ liệu môi trường 20 tự nhiên [44]. Trong thực tế, một số nghiên cứu cũng đã đánh giá kết quả từ mô hình PMF tốt hơn từ các mô hình khác khi sử dụng song song vài mô hình với cùng một bộ dữ liệu [39, 42, 58]. Trong điều kiện, Việt Nam khi chưa có bộ hồ sơ nguồn thải để sử dụng CMB thì PMF là lựa chọn tốt nhất để có kết quả đáng tin cậy. Đây cũng là lý do nghiên cứu áp dụng mô hình PMF trong nhận dạng và xác định phần đóng góp của các dạng nguồn thải chính tới bụi trong không khí.

1.6. Ảnh hưởng của bụi PM_{2.5} đến kinh tế, môi trường và sức khỏe con người

1.6.1. Ảnh hưởng đến kinh tế

Bụi PM_{2.5} với kích thước siêu nhỏ có khả năng thâm nhập sâu vào phổi và máu, không chỉ gây ra những tác động nghiêm trọng đến sức khỏe cộng đồng mà còn dẫn đến các hệ lụy kinh tế trên cả phạm vi quốc gia và quốc tế. Theo báo cáo của Ngân hàng Thế giới, ÔNKK, trong đó PM_{2.5} là yếu tố chính, gây thiệt hại kinh tế cho Việt Nam tương đương khoảng 5% GDP mỗi năm. Các thiệt hại này bao gồm chi phí y tế gia tăng, suy giảm năng suất lao động, tổn thất nông nghiệp và giảm doanh thu từ du lịch. Chi phí y tế chủ yếu đến từ việc điều trị các bệnh liên quan đến hệ hô hấp, tim mạch và ung thư, vốn có mối liên hệ chặt chẽ với bụi PM_{2.5}. Nghiên cứu của WHO cũng chỉ ra rằng, việc tiếp xúc với PM_{2.5} làm gia tăng tỷ lệ tử vong sớm, gây áp lực lớn lên hệ thống y tế và ngân sách quốc gia [169].

Đồng thời, sự gia tăng các bệnh mãn tính và tử vong sớm khiến lực lượng lao động bị suy giảm cả về số lượng lẫn chất lượng, làm giảm hiệu quả sản xuất và kéo theo các chi phí bổ sung cho doanh nghiệp. Theo nghiên cứu của Quỹ Môi trường Toàn cầu (Global Environment Facility), năng suất lao động ở các khu vực bị ô nhiễm nặng có thể giảm tới 20%, đặc biệt trong các ngành công nghiệp yêu cầu cường độ lao động cao [164].

Trong lĩnh vực nông nghiệp, một nghiên cứu của Long Ta Bui và cộng sự (2024) cho thấy bụi PM_{2.5} đã gây suy giảm năng suất lúa đáng kể tại khu vực Tứ giác Long Xuyên, Đồng bằng sông Cửu Long, đặc biệt ở các vùng gần khu công nghiệp và đô thị. Thiệt hại kinh tế hàng năm được ước tính từ 3,8 đến 8,4 triệu USD, ảnh hưởng trực tiếp đến sinh kế của nông dân, ngành lúa gạo và an ninh lương thực quốc gia. Ngoài ra, tác động lâu dài của ÔNKK còn đe dọa khả năng canh tác bền vững [163].

Ngoài ra, ÔNKK làm suy giảm sức hấp dẫn của các điểm đến du lịch, đặc biệt ở các thành phố lớn như Hà Nội và TP. Hồ Chí Minh, khiến du khách lựa chọn các điểm đến khác, từ đó giảm nguồn thu từ ngành du lịch. Theo báo cáo của Tổng cục Du lịch Việt Nam, doanh thu từ du lịch tại Hà Nội đã giảm 15% trong các mùa cao điểm, do lo ngại về chất lượng không khí [179].

Trên phạm vi quốc tế, báo cáo của WHO cho thấy ÔNKK, trong đó bụi $PM_{2.5}$ chiếm tỷ trọng lớn, gây thiệt hại hơn 225 tỷ USD mỗi năm do suy giảm năng suất lao động, trong khi thiệt hại về sức khỏe lên tới hơn 5.000 tỷ USD [100]. Ngoài ra, ô nhiễm $PM_{2.5}$ còn làm gia tăng chi phí đầu tư cho các giải pháp kiểm soát và giảm thiểu ô nhiễm như lắp đặt hệ thống lọc khí, phát triển năng lượng tái tạo, và cải thiện hệ thống giao thông công cộng, tạo áp lực lớn lên ngân sách các quốc gia.

1.6.2. Ảnh hưởng đến biến đổi khí hậu

Bụi $PM_{2.5}$ không chỉ là tác nhân chính gây ÔNKK và ảnh hưởng nghiêm trọng đến sức khỏe con người, mà còn có mối liên hệ chặt chẽ với biến đổi khí hậu thông qua các cơ chế phát thải và tác động môi trường. $PM_{2.5}$ là một phần của khí thải từ hoạt động đốt nhiên liệu hóa thạch, bao gồm dầu mỏ, than đá và khí tự nhiên những nguồn phát thải khí nhà kính lớn nhất. Các hạt này thường đi kèm với CO_2 , CH_4 và các khí nhà kính khác, làm gia tăng hiệu ứng nhà kính và gây ra sự nóng lên toàn cầu. Theo nghiên cứu của Chương trình Môi trường Liên Hợp Quốc (UNEP), lượng phát thải bụi $PM_{2.5}$ từ các hoạt động công nghiệp và giao thông đóng góp khoảng 25% vào tổng lượng khí nhà kính toàn cầu.

Bên cạnh đó, $PM_{2.5}$ chứa các hạt carbon đen (black carbon), một trong những thành phần hấp thụ nhiệt mạnh nhất trong khí quyển, chỉ đứng sau CO_2 về khả năng làm nóng khí hậu. Carbon đen có khả năng hấp thụ bức xạ mặt trời, làm tăng nhiệt độ không khí và ảnh hưởng trực tiếp đến sự tan chảy của băng ở các vùng cực. Một nghiên cứu từ Tổ chức Khí tượng Thế giới (WMO) chỉ ra rằng carbon đen từ $PM_{2.5}$ đóng góp 1,1 W/m² vào tổng năng lượng hấp thụ trên Trái đất, chiếm khoảng 7% tác động của hiệu ứng nhà kính toàn cầu. Ngoài ra, khi các hạt $PM_{2.5}$ lắng đọng trên bề mặt băng tuyết, chúng làm giảm độ phản xạ ánh sáng (albedo), khiến băng tan nhanh hơn, đặc biệt ở khu vực Bắc Cực và dãy Himalaya [170].

Đáng chú ý, ô nhiễm $PM_{2.5}$ và biến đổi khí hậu có mối quan hệ tương tác hai chiều. Biến đổi khí hậu làm gia tăng mức độ ô nhiễm $PM_{2.5}$ thông qua các hiện tượng như đảo nhiệt (temperature inversion), khiến các hạt bụi không thể khuếch tán và tập trung ở tầng khí quyển thấp. Đồng thời, $PM_{2.5}$ từ các vụ cháy rừng – một hệ quả của

biến đổi khí hậu – cũng gia tăng đáng kể, tạo thành một vòng lặp tiêu cực giữa hai vấn đề này. Một báo cáo từ Ngân hàng Thế giới nhấn mạnh rằng các vụ cháy rừng ở Đông Nam Á trong thập kỷ qua đã làm tăng lượng bụi $PM_{2.5}$ lên tới 30%, đồng thời phát thải hàng triệu tấn CO_2 vào khí quyển [169].

1.6.3. Ảnh hưởng đến sinh vật

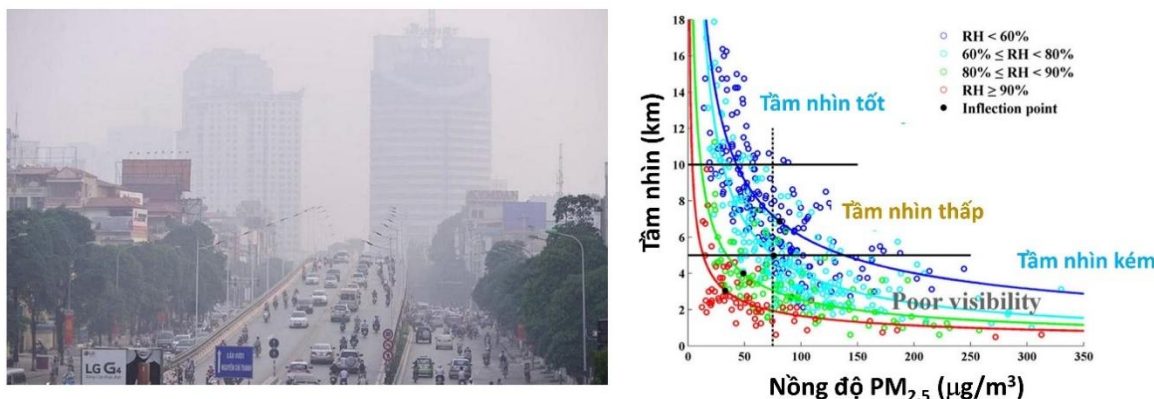
Sự lắng đọng của bụi trên thực vật bị ảnh hưởng bởi kích thước và mật độ của hạt bụi. Thảm thực vật sẽ chịu những tác động trực tiếp hoặc gián tiếp khi tiếp xúc với các hạt ô nhiễm gây hại thông qua quá trình lắng đọng khô và ướt.

Các tác động như gây tắc nghẽn khí khổng, giảm hoạt động quang hợp, rụng lá... phần lớn là do tác động của các hạt thô. Ảnh hưởng và ức chế sự hấp thụ chất dinh dưỡng của thực vật là tác động gián tiếp của bụi $PM_{2.5}$ gây nên có tác động lớn đến mặt đa dạng sinh học của hệ sinh thái. Do sự lắng đọng của các kim loại nặng, các chất ô nhiễm có tính acid (bụi nitrate, bụi sunfate,...) có tác động đến thành phần hóa học trong đất và nước nơi chúng lắng đọng, các tác động chính của $PM_{2.5}$ đối với hệ sinh thái là các tác động gián tiếp xảy ra thông qua đất và nước làm ảnh hưởng đến sự sinh sôi và phát triển của thực vật.

1.6.4. Ảnh hưởng đến việc suy giảm tầm nhìn

Các hoạt động công nghiệp hóa và đô thị hóa trên khắp thế giới đã dẫn đến sự gia tăng ÔNKK và tình trạng khói mù ở cả các nước đang phát triển và đã phát triển. Suy giảm tầm nhìn được đặc trưng bởi hai đại lượng chính là hệ số tắt ánh sáng (light extinction coefficient - biểu thị lượng ánh sáng mất đi trên một đơn vị khoảng cách bởi cơ chế tán xạ và hấp thụ ánh sáng) và phạm vi thị giác (hay tầm nhìn), ngoài ra còn có độ tương phản và màu sắc. Sự suy giảm tầm nhìn được phân thành (1) hạn chế tầm nhìn, (2) khói mù khu vực (do sự kết hợp của nhiều nguồn trong một khu vực). Bụi $PM_{2.5}$ là các hạt có ảnh hưởng rất lớn đến sự tán xạ ánh sáng, các hạt tán xạ ánh sáng hiệu quả nhất nằm trong phạm vi kích thước từ 0,4 μm đến 0,7 μm trong phạm vi của sóng nhìn thấy. Khi ánh sáng mặt trời tiếp xúc với các hạt lơ lửng trong khí quyển tạo nên sương mù, nồng độ các chất ô nhiễm cao sẽ dẫn đến lượng sương mù nhiều và dày hơn do tác dụng hấp thụ và tán xạ của các hạt. Ví dụ, các hạt sulfate

có thể tán xạ nhiều ánh sáng hơn trong điều kiện ẩm ướt. Sương mù gây ra hiện tượng suy giảm tầm nhìn vì nó làm giảm độ rõ và màu sắc của các đối tượng. Mức độ dày đặc của sương mù phụ thuộc vào nồng độ của các hạt và khí trong khí quyển có thể hấp thụ và tán xạ ánh sáng trong vùng bước sóng nhìn thấy.



Hình 1. 11: Sự suy giảm tầm nhìn do ảnh hưởng của bụi PM_{2.5}

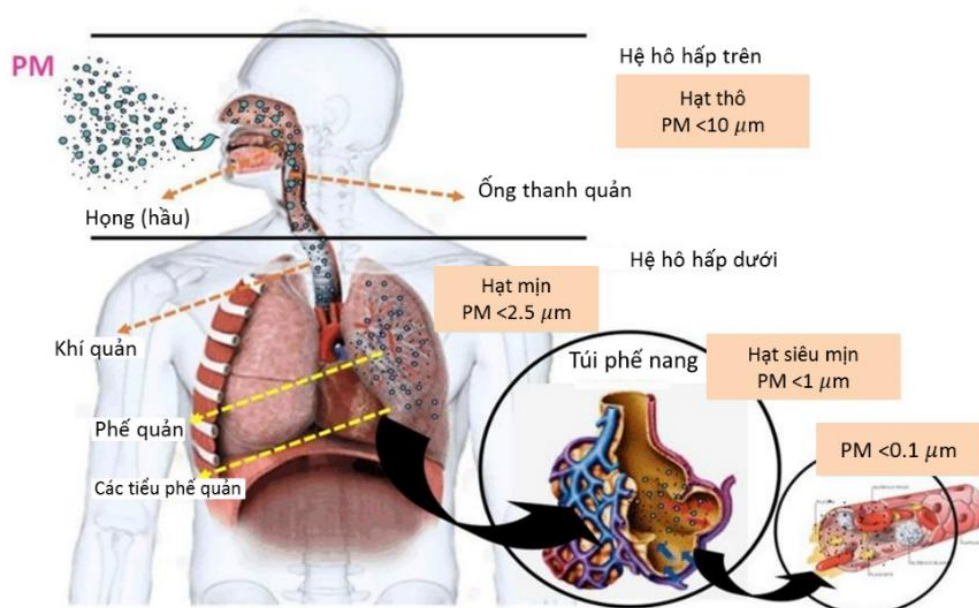
1.6.5. Ảnh hưởng đến sức khỏe con người

Hệ hô hấp của con người được chia làm hai phần gồm hệ hô hấp trên và hệ hô hấp dưới. Hệ hô hấp trên bao gồm mũi, họng, thanh quản. Hô hấp dưới gồm các cấu trúc ở dưới thanh quản, đó là khí quản, phế quản và phổi.

Hít phải các hạt ô nhiễm sẽ gây nên những tác động trực tiếp đến hệ hô hấp cũng như sức khỏe của con người. Phụ thuộc vào kích thước của các hạt, các hạt có kích thước càng nhỏ sẽ dễ dàng thâm nhập sâu hơn trong hệ thống hô hấp, thậm chí là xâm nhập vào máu, dẫn đến các bệnh liên quan đến hệ thống hô hấp và tim mạch và có thể gây tử vong (Hình 1.9). Các hạt thô chủ yếu lắng đọng trong các đường mũi, họng và thanh quản, khí quản và phế quản. Các hạt mịn thâm nhập sâu hơn vào đường thở và lắng đọng trong các tiểu phế quản và phế nang của phổi [129].

Một chất ô nhiễm có thể ảnh hưởng xấu đến sức khỏe như thế nào phụ thuộc vào hình thái và thời gian lưu trú của nó trong khí quyển. PM_{2.5} có kích thước rất nhỏ và thời gian tồn tại lâu hơn so với PM₁₀ (từ vài ngày đến vài tuần), xâm nhập vào phổi, vào máu và đến các cơ quan khác gây ra ảnh hưởng lớn đối với sức khỏe con người [182]. Bên cạnh đó, vì phần lớn bụi PM_{2.5} được hình thành thông qua các phản ứng hóa học nên độc tính của nó cũng cao hơn so với bụi thô, việc phơi nhiễm dài

hạn với $PM_{2.5}$ đặc biệt có hại cho sức khỏe vì có thể dễ dàng hít vào và xâm nhập sâu vào phổi làm tăng tỉ lệ tử vong do tim mạch và hô hấp. Theo WHO ước tính có khoảng 7 triệu người chết hàng năm do tiếp xúc với các hạt mịn trong không khí ô nhiễm xâm nhập sâu vào phổi và hệ tim mạch, gây ra các bệnh như đột quỵ, bệnh tim, ung thư phổi, bệnh phổi tắc nghẽn mãn tính và nhiễm trùng đường hô hấp, bao gồm cả viêm phổi.

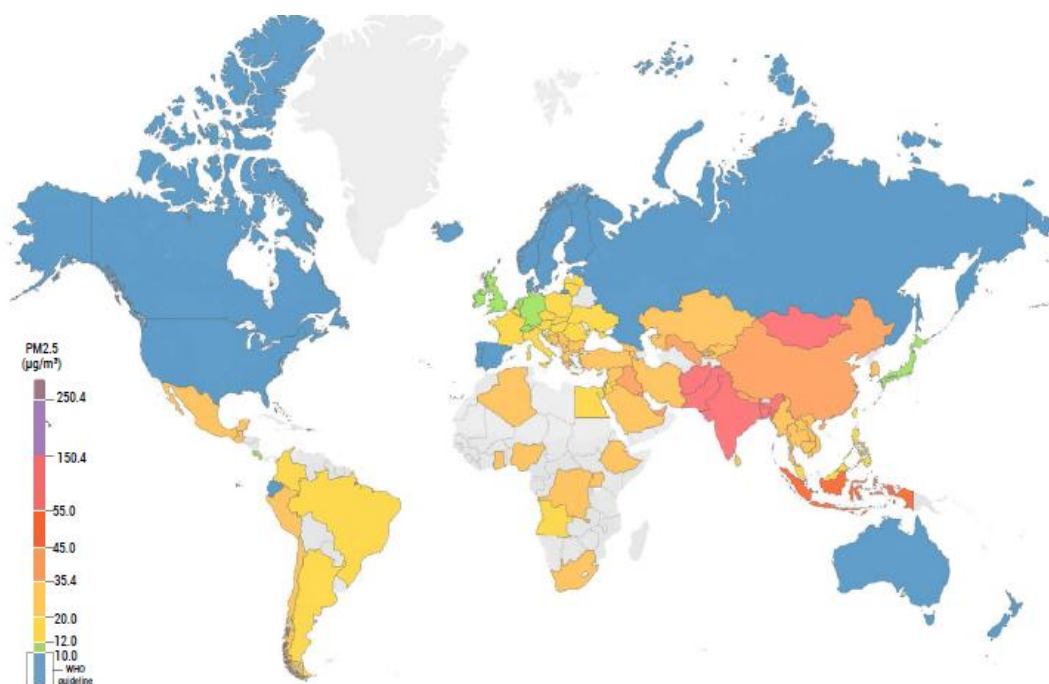


Hình 1. 12: Tác động của kích thước hạt đến các bộ phận của hệ hô hấp trong cơ thể con người

Theo WHO và IARC cho biết mật độ bụi PM_{10} trong không khí tăng lên $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ thì tỉ lệ ung thư phổi tăng 22% và tăng đến 36% nếu tăng nồng độ $PM_{2.5}$ thêm $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [193]. Một nghiên cứu cho rằng việc gia tăng nồng độ $PM_{2.5}$ cũng dẫn đến việc tăng khả năng lây truyền vi rút cúm [40]. Tại Việt Nam, Lượng và cộng sự (2017) tìm thấy mối liên hệ chặt chẽ giữa ÔNKK và các bệnh về đường hô hấp, trong đó sự gia tăng $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ $PM_{2.5}$ có liên quan đến nguy cơ nhập viện cao hơn 2,2% [86]. Trong nghiên cứu chỉ ra mối liên hệ giữa đại dịch Covid - 19 cũng chỉ ra được rằng mối tương quan giữa nồng độ $PM_{2.5}$ đối với tỉ lệ tử vong do dịch bệnh khi mà cứ tăng trung bình nồng độ $PM_{2.5}$ $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ trong một khoảng thời gian nhất định sẽ làm tăng tỉ lệ tử vong do Covid - 19 với khoảng tin cậy 95% [144].

1.7. Tổng quan nghiên cứu về vấn đề ô nhiễm bụi PM_{2.5}

Theo báo cáo của WHO năm 2019 có đến 99 % dân số toàn cầu sinh sống ở các khu vực có mức chất lượng không khí (bao gồm PM_{2.5}) vượt quá giới hạn khuyến nghị của tổ chức này. Cũng trong năm này, ÔNKK ngoài trời đã góp phần gây ra khoảng 4,2 triệu ca tử vong sớm, trong khi tổng số ca tử vong sớm từ ÔNKK (ngoài trời và trong nhà) lên đến 6,7 triệu ca toàn cầu [161].

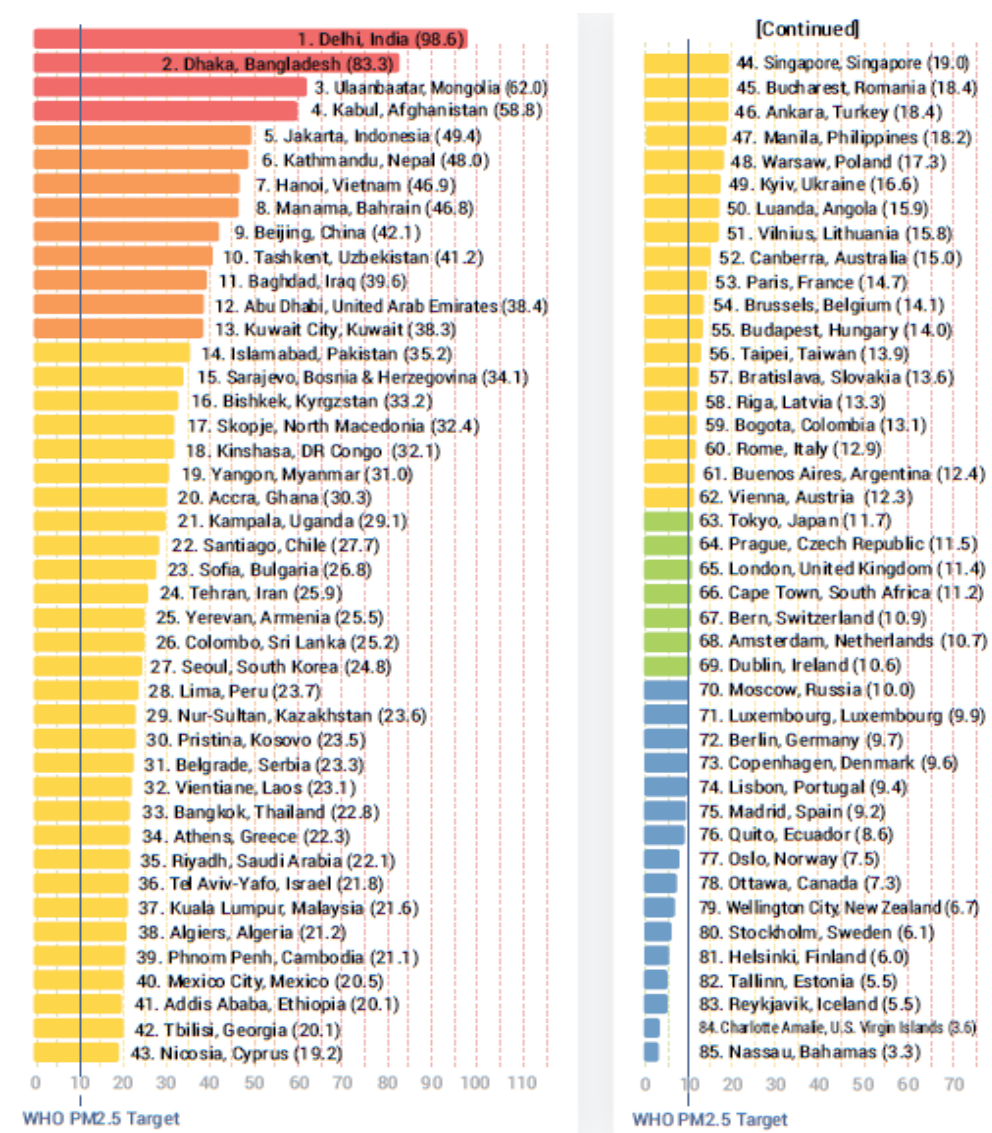


Hình 1. 13: Bản đồ toàn cầu về nồng độ bụi PM_{2.5} ước tính theo quốc gia / khu vực vào năm 2019

Nguồn: WHO năm 2019

Mức độ phơi nhiễm PM_{2.5} trung bình theo quốc gia (Hình 1.13) cho thấy các quốc gia và khu vực ở Đông Á, Đông Nam Á và Nam Á có nồng độ PM_{2.5} trung bình hàng năm cao nhất tính theo dân số. Đồng thời màu xám trên bản đồ biểu thị các quốc gia/khu vực không có đủ dữ liệu PM_{2.5} năm 2019. Hình 1.14 trong năm 2019, thủ đô Delhi là thành phố có nồng độ bụi PM_{2.5} trung bình hàng năm cao nhất trên thế giới, đạt mức 98,6 µg/m³, gần gấp 10 lần so với mức khuyến nghị của WHO (10 µg/m³). Thủ đô Hà Nội của Việt Nam đứng thứ 7 với hàm lượng bụi PM_{2.5} trung bình là 46,9 µg/m³ [101]. Nhìn chung vấn đề ô nhiễm bụi PM_{2.5} đa phần nằm ở các thành phố ở

khu vực Châu Á nơi có mật độ dân số đông và là các nước thuộc nhóm đang phát triển. Do đó, các nghiên cứu, công bố về vấn đề này được tập chung ở các nước Châu á được thể hiện rõ qua các nghiên cứu trong nước và thế giới.



Hình 1. 14: Nồng độ trung bình hàng năm của PM_{2.5} (µg/m³) tại các thành phố trên thế giới

Nguồn: WHO năm 2019

1.7.1. Tổng quan các nghiên cứu trên thế giới về ô nhiễm bụi PM_{2.5}

PM_{2.5} đã được xác định là một trong những thành phần chính trong không khí toàn cầu, thông số ô nhiễm trong giám sát CLKK với những tác động tiêu cực về sức

khỏe con người và môi trường. Những tác động này là được cho là do sự vận chuyển tầm xa của PM_{2.5} và quỹ đạo di chuyển phức tạp của chúng [33, 50], tính chất hóa lý của hạt bụi, điều kiện khí tượng và điều kiện địa hình [38, 87]. Trong nghiên cứu tại 29 nước thuộc Châu Âu, tỷ lệ mắc các bệnh về đường hô hấp tăng 0,58% khi nồng độ PM₁₀ tăng thêm 10 µg/m³ trong khi tỷ lệ mắc bệnh về hô hấp do PM_{2.5} gây ra lại tăng đến 8% khi nồng độ của chất này tăng thêm 10 µg/m³ [193]. PM_{2.5} và PM₁₀ có khả năng làm tăng tỉ lệ bệnh tim mạch vành hơn là những chất ô nhiễm dạng khí, tỉ lệ tử vong do bệnh tim mạch vành từ PM_{2.5} và PM₁₀ tăng 12% khi tăng thêm 10 µg/m³ mỗi loại, nguy hiểm gấp 4 lần so với SO₂, 3 lần so với NO₂ và CO (carbon monoxide) và 2 lần đối với O₃ (ozone) [194]. Riêng PM_{2.5} làm tăng tỷ lệ mắc bệnh thiếu máu cơ tim lên 9,6% [162]. Theo ước tính, trên thế giới, 3% khả năng gây ung thư phổi và 5% dẫn đến tử vong là do bụi [140]. Trong khi đó các thành phần trên bụi, đặc biệt là các thành phần có độc tính cao sẽ làm gia tăng rủi ro đến sức khỏe con người.

Theo Cơ quan nghiên cứu Ung thư Quốc tế (IARC) công bố: As, Cd và Cr (VI) là các nguyên tố thuộc nhóm 1 của tác nhân gây ung thư, Pb và Co được xếp vào nhóm có thể gây ung thư (nhóm 2A) và Ni thuộc nhóm 2B trong số các chất gây ung thư [26]. Trong nghiên cứu tại Nhật bản kết quả đánh giá sức khỏe con người tiết lộ thêm rằng trẻ con sống tại địa điểm lấy mẫu phải đối mặt với nguy cơ không gây ung thư nghiêm trọng (HI = 7,8) và nguy cơ gây ung thư vừa phải (CR = $1,2 \times 10^{-4}$) và kết quả cho rằng rủi ro bởi ăn uống qua đường miệng là con đường phơi nhiễm quan trọng nhất, tiếp theo là tiếp xúc qua da và con đường hít thở từ đó đưa ra khuyến cáo là cần tăng cường kiểm soát nguồn kim loại có nguy cơ cao gây ảnh hưởng đến sức khỏe con người [155].

Nguy cơ gây ung thư đáng kể đã được quan sát thấy đối vào mùa thu ở Pingyao - Trung Quốc chỉ ra với việc tiếp xúc với Ni trong môi trường ngoài trời là nguyên nhân chính ảnh hưởng đến sức khỏe [137]. Đánh giá rủi ro sức khỏe con người do US. EPA khuyến nghị đã được sử dụng để đánh giá rủi ro gây ung thư ở nam giới trưởng thành, phụ nữ trưởng thành và trẻ con: Kết quả chỉ ra trẻ con phải đối mặt với nguy cơ nhiễm kim loại nặng PM_{2.5} cao hơn so với người lớn Cr (VI), As và Cd là ba

nguyên tố có nguy cơ gây ung thư cao nhất ở các thành phố thủ phủ của tỉnh phía bắc Trung Quốc tồi tệ hơn so với ở miền Nam [74].

Các nghiên cứu về tính chất vật lý dựa trên kính quét hiển vi điện tử (SEM) cho thấy hình dạng hạt là các hạt hình cầu và hạt siêu mịn có thành phần chính là Fe [77]. Một nghiên cứu khác ở thành phố Trịnh Châu - Trung Quốc (2018) chỉ ra các hình thái của các hạt bụi cũng được cho là có kích thước khác nhau và các hạt không đồng đều về hình dạng. Các hạt bụi phát sinh từ mặt đường thường là các hạt có đường kính lớn tuy nhiên các hạt được phát sinh từ hoạt động giao thông lại là những hạt có kích thước nhỏ chúng phát sinh từ hoạt động của bánh xe và mòn lốp [64]. Trong một nghiên cứu khác ở thành phố Trịnh Châu (2021) cho thấy sự gia tăng nồng độ bụi $PM_{2.5}$ chủ yếu đến từ các hạt có kích thước rất nhỏ từ dạng nano từ 400 - 1000 nm và các hạt có kích thước lớn hơn từ 1 - 1,6 μm chiếm ưu thế trong nghiên cứu này [136].

Các nghiên cứu về thành phần kim loại trong bụi cũng được quan tâm thực hiện. Một nghiên cứu thực hiện ở Trung Quốc vào năm 2006 đã tìm thấy sự có mặt các kim loại nặng (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, Mn và As) trong bụi $PM_{2.5}$. Nhìn chung, nồng độ của các kim loại nặng tại đây cao hơn nhiều lần (4 - 33 lần) so với nồng độ kim loại nặng ở các nước Châu Á khác như Nhật Bản, Hồng Kông, Thượng Hải, Việt Nam, Indonesia, Đài Loan và Hàn Quốc. Nồng độ của kim loại nặng tại đây cao không phải do khí thải từ phương tiện giao thông, mà là do khí thải từ quá trình sưởi ấm và đốt chất thải điện tử [165]. Trong một nghiên cứu tại nguồn đến từ trạm thu phí cao tốc tại thành phố Thiên Tân, Trung Quốc cho thấy nồng độ phơi nhiễm $PM_{2.5}$ trung bình là $230,73 \mu g/m^3$, với độ lệch chuẩn là $142,99 \mu g/m^3$ đối với các đối tượng được chọn. Pb, Zn và Cr là những nguyên tố kim loại có nhiều nhất, chiếm trên 70% tổng số kim loại nặng [75]. Nghiên cứu ở Agra - Ấn Độ đánh giá nồng độ kim loại trung bình hàng năm của Ni, As và Cd cao hơn giới hạn của của tiêu chuẩn CLKKXQ quốc gia và WHO. Nồng độ kim loại cao nhất xảy ra vào mùa đông, trong khi nồng độ thấp nhất được quan sát thấy trong mùa gió mùa. Phân tích hệ số làm giàu (EF) cho thấy Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd và Pb chủ yếu là từ các nguồn nhân tạo và

nhóm kim loại này đề nằm trong nhóm được cho là có nguy cơ ảnh hưởng lớn đến sức khỏe con người đã được IARC cảnh báo [25, 111].

Trong số nhiều thành phần, các ion vô cơ chiếm một phần đáng kể trong khối lượng khô PM_{2.5}, dao động từ 17 đến 74% tùy thuộc vào vị trí. Các ion vô cơ chính hòa tan trong nước là sunfat (SO₄²⁻), nitrat (NO₃⁻) và amoni (NH₄⁺), trong khi các ion phụ bao gồm natri (Na⁺), clorua (Cl⁻), kali (K⁺), magie (Mg²⁺) và canxi (Ca²⁺). Tỷ lệ phần trăm lượng các ion đóng góp vào các hạt bụi phụ thuộc vào một tập hợp phức tạp các nguồn và các yếu tố môi trường xung quanh [150]. Cụ thể, tại Bắc Kinh nồng độ trung bình của ion hòa tan là 44 µg/m³, chiếm 38% tổng khối lượng PM_{2.5} [173]. Nồng độ trung bình của ion hòa tan là 63,1 ± 35,3 µg/m³, chiếm khoảng 45,3% tổng khối lượng PM_{2.5} ở Hàm Đan [183]. Ion Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻ và NH₄⁺ là các ion tan trong nước chính trong PM_{2.5} được thu thập tại khu vực ngoại ô Đường Sơn. Các ion hòa tan trong nước chính trong PM đã được phân tích và nguồn gốc của các ion hòa tan trong nước. Kết quả phân tích nguồn gốc cho thấy ở ngoại ô Đường Sơn là bụi xây dựng, bụi gió, nguồn cố định và nguồn di động [133]. Trong một nghiên cứu khác ở Bangkok nghiên cứu được xây dựng khảo sát theo độ cao khác nhau (30m, 75m và 110m) đã đánh giá nhóm NO₃⁻, NH₄⁺ và SO₄²⁻ là các yếu tố chính đóng góp vào nồng độ bụi PM_{2.5} [109]. Hầu hết các nghiên cứu đều cho thấy sự đóng góp lớn về khối lượng của các ions hòa tan trong nước đến nồng độ bụi PM_{2.5} chúng tồn tại dưới sự khác nhau trong các điều kiện thời tiết khác nhau (ví dụ: vào mùa đông thì các ion tồn tại dưới dạng KCl, NH₄NO₃ và (NH₄)₂SO₄ và mùa hè thì tồn tại dưới dạng NH₄HSO₄, K₂SO₄ và NH₄NO₃) [133].

1.7.2. Tổng quan các nghiên cứu ở Việt Nam về ô nhiễm bụi PM_{2.5}

Việt Nam xếp thứ 21 trên thế giới về ô nhiễm bụi PM_{2.5} năm 2020, với nồng độ PM_{2.5} trung bình năm là 28,1 µg/m³. Con số này gấp gần 1,15 lần giá trị cho phép theo quy chuẩn Việt Nam (QCVN 05:2023) và gấp 2,8 lần mức khuyến nghị của WHO (10 µg/m³). Tại các thành phố lớn như Hà Nội, Huế, Đà Nẵng và TP.HCM đều ô nhiễm bụi PM_{2.5} vượt quy chuẩn Việt Nam và hướng dẫn an toàn của WHO trong năm 2020 [142]. Đặc biệt vừa qua vào tháng 12/2023 Thành phố Hà Nội được ghi

nhận là thành phố có chất lượng không khí ô nhiễm nhất thế giới mặc dù theo thống kê trước đó vào năm 2019 đứng thành phố chỉ đứng thứ 7 trên thế giới. Điều đó cho thấy mức độ ô nhiễm tại nước ta ngày càng nghiêm trọng và ảnh hưởng lớn đến sức khỏe con người. Hiện nay, ở Việt Nam đã có các trạm quan trắc tự động về chỉ số bụi $PM_{2.5}$ tuy nhiên các trạm này mới chỉ phản ánh được nồng độ bụi $PM_{2.5}$ tại các vị trí được đo mà chưa thể cho một cái nhìn chính xác về mức độ nguy hiểm của các hạt bụi đối với sức khỏe con người bởi các đặc tính hóa lý của các hạt bụi đó gây ra. Mức độ nguy hiểm của các hạt $PM_{2.5}$ được xác định bởi các tính chất vật lý và tính chất hóa học của chúng [120]. Tính chất vật lý bao gồm nồng độ, số lượng hạt, diện tích bề mặt, phân bố kích thước và hình thái học. Trong đó chỉ có nồng độ của bụi có thể sử dụng phương pháp đo trực tiếp còn lại các đặc điểm khác chúng đều phải sử dụng các phương pháp phù hợp để xác định. Các nghiên cứu về tính chất hóa học của bụi $PM_{2.5}$ hầu hết cũng được thực hiện hoàn toàn trong phòng thí nghiệm. Do đó, để nghiên cứu được toàn bộ đặc tính hóa lý của chúng thì lấy mẫu hiện trường là cần thiết. Điều đó được minh chứng cụ thể qua các nghiên cứu dưới đây:

Nghiên cứu của Cohen và cộng sự (2010) thông qua việc sử dụng mô hình HYSPLIT để chạy ra quỹ đạo ngược, nhóm tác giả đã kết luận rằng, việc vận chuyển bụi trong phạm vi tầm xa, từ các vùng sa mạc Taklamakan và Gobi (hơn 3000 km về phía tây bắc) chiếm 76% các sự kiện ô nhiễm liên quan đến đất. Ba nhà máy điện địa phương của Việt Nam đã đóng góp vào 15% các sự kiện ô nhiễm liên quan đến than, trong khi bốn nhà máy điện Trung Quốc từ 300 km đến 1700 km về phía Đông Bắc của Hà Nội đã đóng góp 50% tổng số sự kiện than cực đoan đo được tại địa điểm lấy mẫu Hà Nội [33].

Nghiên cứu của Hiền và cộng sự (2022) ở hai thành phố đông dân nhất cả nước là Hồ Chí Minh và Hà Nội về 15 kim loại (dạng) vết (Fe, Al, Mn, Ti, Zn, V, Cu, Ni, Co, Cd, Pb, Th, Cr, As và Sb) trong bụi $PM_{2.5}$ kết quả cho thấy Zn là kim loại hòa tan nhiều nhất trong $PM_{2.5}$ ở cả hai thành phố, với số lượng rất lớn các phương tiện giao thông đường bộ (ví dụ như độ mòn của lốp xe) có khả năng góp phần ở cả hai thành phố và sản xuất kim loại màu là một nguồn bổ sung đáng kể ở Hà Nội. Fe và

Al có nguồn gốc từ các nguồn vỏ trái đất, là những kim loại chiếm ưu thế sau Zn. Hầu hết nồng độ các kim loại vi lượng ở Hà Nội đều cao hơn ở TP.HCM, đặc biệt là các kim loại độc hại như Pb, Cd, Cr và As. V và Ni là hai kim loại duy nhất có nồng độ ở TP.HCM cao hơn ở Hà Nội, có thể là do khí thải vận chuyển (đốt dầu nhiên liệu nặng) ảnh hưởng mạnh đến CLKK ở TP.HCM. Các nhà máy điện than và sản xuất kim loại màu có thể là nguồn cung cấp kim loại vi lượng chính ở Hà Nội. Đánh giá rủi ro sức khỏe cho thấy có nguy cơ gây ung thư cao khi hít phải các kim loại vi lượng hòa tan liên kết với PM_{2.5} ở cả hai thành phố [171]. Cũng trong một nghiên cứu khác của tác giả ở TP.HCM về bụi PM_{2.5} cho thấy nồng độ được thay đổi từ 10,4 - 110,8 µg/m³, với giá trị trung bình hàng năm là 36,3 ± 13,7 µg/m³. Tất cả các nồng độ trung bình hàng năm tại các vị trí quan sát đều vượt ngưỡng giá trị tiêu chuẩn Việt Nam (25 µg/m³), cho thấy bầu không khí tại TP.HCM đang chịu ảnh hưởng mạnh từ các nguồn phát thải chủ yếu là địa phương. Ngoài ra, nghiên cứu còn chỉ ra sự thay đổi theo mùa với mức thấp nhất được quan sát thấy trong mùa mưa và mức cao nhất là vào mùa khô [124].

Dương và cộng sự (2022) nghiên cứu về các ion hòa tan trong nước kết quả cho thấy SO₄²⁻ là ion chiếm khoảng 50% tổng hàm lượng ion, tiếp theo là NO₃⁻, K⁺, và NH₄⁺. SO₄²⁻ chủ yếu được hình thành thông qua các phản ứng ở pha khí, đặc biệt là dưới dòng chảy đô thị khi khả năng oxy hóa mạnh hơn và mức độ tiền chất của nó cao hơn được quan sát thấy. Dựa trên các quỹ đạo lùi HYSPLIT và phân tích quỹ đạo trọng số nồng độ, người ta xác định rằng sự gia tăng nồng độ K⁺ trong PM_{2.5} do đốt cháy sinh khối có mối liên hệ chặt chẽ với ảnh hưởng của các khối không khí có nguồn gốc từ các quốc gia thuộc khu vực xích đạo Đông Nam Á [61].

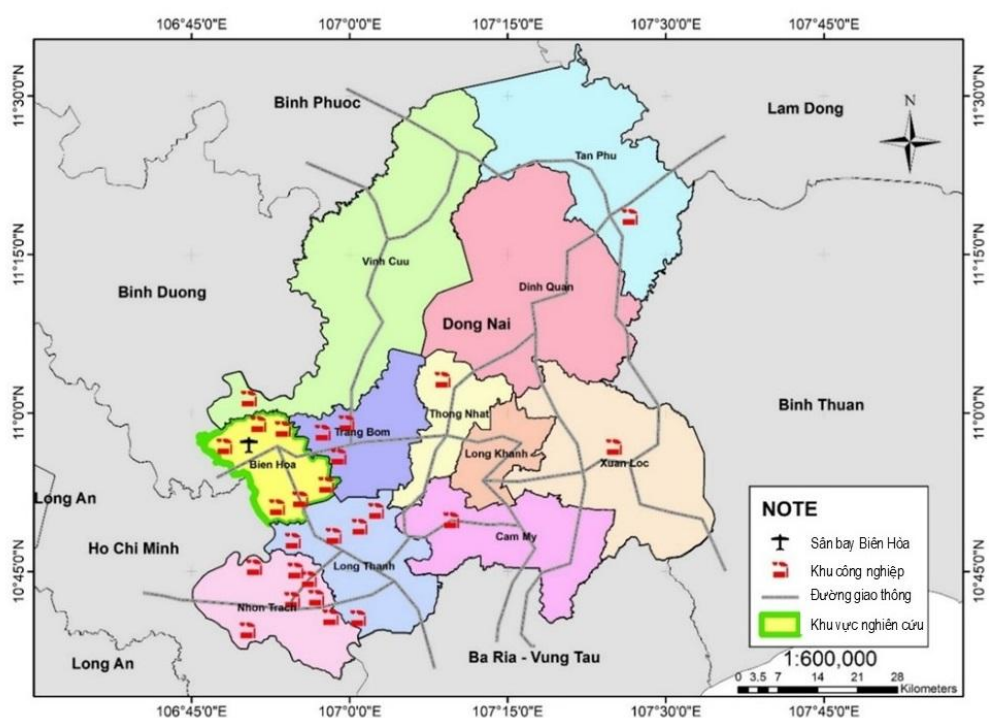
Ở Việt Nam, các nghiên cứu về ÔNKK chủ yếu được triển khai ở hai thành phố lớn và có mức ÔNKK cao nhất nước là Hà Nội và Hồ Chí Minh [50, 92]. Tuy nhiên rất ít các nghiên cứu về hình thái và phân bố cấp hạt. Các nghiên cứu phân cấp hạt bụi thường sử dụng thiết bị lấy mẫu phân tầng Cascade Impactor (Tisch Environment, Inc.) [69] hoặc Nanosampler II (Kanomax Japan Inc.) [107]. Theo đó các cấp độ kích thước hạt bụi được lấy mẫu đồng thời theo cấp bậc phân loại định sẵn của nhà sản

xuất. Xu thế hiện nay các nhà khoa học trên thế giới đã và đang có nhiều nghiên cứu chuyên sâu hơn bằng cách sử dụng các công nghệ hiện đại như chụp ảnh mẫu bụi bằng phương pháp kính hiển vi điện tử quét (Scanning Electron Microscopy, SEM) để có thể quan sát được các hình thái, kích thước, số lượng của các hạt mịn tồn ít thời gian và công sức hơn [70, 108, 110, 125]. Qua đó còn có thể định hướng được trọng tâm các nghiên cứu được thực hiện tiếp theo.

1.8. Tổng quan về thành phố Biên Hòa, tỉnh Đồng Nai

Nghiên cứu được thực hiện tại thành phố Biên Hòa nằm ở phía tây tỉnh Đồng Nai, có vị trí địa lý như Hình 1.15:

- Phía đông giáp huyện Trảng Bom (nay là xã Trảng Bom, tỉnh Đồng Nai).
- Phía tây giáp thành phố Dĩ An (nay là phường Dĩ An, Thành phố Hồ Chí Minh) và thành phố Tân Uyên thuộc tỉnh Bình Dương (nay là Phường Tân Uyên, Thành phố Hồ Chí Minh).
- Phía nam giáp huyện Long Thành (nay là Phường Long Thành) và giáp thành phố Thủ Đức (nay là phường Thủ Đức), Thành phố Hồ Chí Minh.
- Phía bắc giáp huyện Vĩnh Cửu (nay là xã Vĩnh Cửu, tỉnh Đồng Nai).



Hình 1. 15: Bản đồ khu vực nghiên cứu

Biên Hòa là một thành phố công nghiệp của tỉnh Đồng Nai, thuộc vùng Đông Nam Bộ, Việt Nam. Thành phố Biên Hòa là đô thị loại I, là đầu mối giao thông quan trọng của vùng kinh tế trọng điểm phía Nam, có sông Đồng Nai chảy qua, cách thủ đô Hà Nội 1.684 km, cách trung tâm Thành phố Hồ Chí Minh 30 km, cách thành phố Vũng Tàu 90 km. Biên Hòa là thành phố trực thuộc tỉnh có dân số đông nhất cả nước. Dân số sinh sống và làm việc ở đây tương đương với 2 thành phố trực thuộc trung ương là Đà Nẵng và Cần Thơ và cao hơn dân số của 37 tỉnh, thành phố trực thuộc trung ương. Trên địa bàn thành phố có các tuyến quốc lộ như Quốc lộ 1A (chiều dài đi qua là 13 km), Quốc lộ 1K (chiều dài đi qua là 14 km và Quốc lộ 51 (chiều dài đi qua là 16 km).

Thành phố này cũng là trung tâm công nghiệp quan trọng của cả nước. Biên Hòa có thế mạnh về công nghiệp và cũng là nơi đi tiên phong trong lĩnh vực Công nghiệp đầu tiên của cả nước với việc hình thành sớm KCN Biên Hòa I (năm 1967) - Khu kỹ nghệ Biên Hòa - Khu công nghiệp đầu tiên của cả nước sau ngày đất nước Thống Nhất. thành phố Biên Hòa hiện có 6 khu công nghiệp:

- Khu công nghiệp Biên Hòa 1/Bien Hoa I Industrial Zone 335 ha
- Khu công nghiệp Biên Hòa 2/Bien Hoa II Industrial Zone: 365 ha
- Khu công nghiệp Amata/Amata industrial park 674 ha
- Khu công nghiệp Loteco/The Long Binh Industrial Zone Development: 100 ha
- Khu công nghiệp Agtex Long Bình/Agtext Long Binh Industrial Park - AGTEX 28:43 ha
- Khu công nghiệp Tam Phước/Tam Phuoc Industrial Park: 323 ha

Bên cạnh ngành công nghiệp hiện đại, hiện thành phố vẫn còn một vài cụm công nghiệp truyền thống, thủ công mỹ nghệ như:

- Cụm công nghiệp Gốm sứ Tân Hạnh: 32ha
- Cụm công nghiệp Dốc 47: 97ha
- Cụm công nghiệp chế biến gỗ Tân Hòa: 39ha
- Vùng thủ công mỹ nghệ đá Bửu Long
- Vùng sản xuất gốm Tân Vạn, Bửu Long, Hiệp Hòa

- Vùng sản xuất đồ gỗ và trang trí nội thất gồm Tân Hòa, Tân Biên

Điều kiện thời tiết đặc trưng của khu vực Đông Nam Bộ nên chịu ảnh hưởng của khí hậu nhiệt đới gió mùa chung của toàn khu vực gồm 2 mùa rõ rệt gồm mùa mưa và mùa khô. Mùa mưa thường bắt đầu từ tháng 5 và kéo dài đến 11, mùa khô thường bắt đầu từ 12 đến tháng 4 năm sau. Nhiệt độ trung bình trong năm từ khoảng 25,4°C - 27,2°C.

Tình hình ÔNKK tại Biên Hòa – Đồng Nai: Kết quả nghiên cứu đo đạc cho thấy nồng độ PM_{2.5} tại TP. Biên Hòa ghi nhận ở mức cao, có xu hướng gia tăng rõ rệt trong mùa khô, đặc biệt tại các khu vực tiếp giáp vùng công nghiệp.

Mạng lưới quan trắc không khí: Theo Quyết định số 377/QĐ-UBND ngày 07/02/2025, tỉnh Đồng Nai duy trì 148 trạm quan trắc tự động phân bố hợp lý vào các khu vực công nghiệp, dân cư, giao thông, sân bay, xử lý chất thải và khai thác đá, nhằm giám sát, cảnh báo và phân tích chất lượng không khí trên toàn tỉnh

Kế hoạch quản lý giai đoạn 2025 - 2030: Kế hoạch đã được phê duyệt là cơ sở pháp lý và chiến lược để thực hiện đồng bộ các nhiệm vụ, dự án nhằm kiểm soát ô nhiễm và cải thiện chất lượng môi trường không khí, phù hợp với định hướng phát triển bền vững của tỉnh Đồng Nai.

Tiểu kết: Qua đó cho thấy nghiên cứu trước thường chỉ tập chung ở các thành phố lớn như Hà Nội và Hồ Chí Minh. Trên thực tế, thành phố Biên Hòa - tỉnh Đồng Nai là nơi tập trung rất nhiều các KCN lớn nhỏ khác nhau, nằm giáp ranh với các thành phố lớn như thành phố Hồ Chí Minh, Bình Dương nên CLKK chắc chắn bị ảnh hưởng. Trong thời gian gần đây, nhiều dự án đã và đang tiến hành với mục tiêu tẩy độc chất độc hóa học tại khu vực sân bay Biên Hòa cũng phân nào làm phát tán bụi và sol khí vào môi trường với các kích thước lớn nhỏ khác nhau và có thể gây ra những nguồn có tính chất khác so với các nghiên cứu trước đây do đặc điểm nguồn và các hoạt động đang diễn ra tại thành Phố. Qua đó, việc nghiên cứu về mức độ bụi PM_{2.5} tại thành phố Biên Hòa - Tỉnh Đồng Nai và các đặc tính hóa lý của chúng để xác định thành phần đóng góp của các nguồn thải và mức độ ảnh hưởng đến sức khỏe con người là một hướng tiếp cận mới, mang tính khoa học cao. Đây cũng là dữ liệu,

cơ sở khoa học góp phần thực hiện xây dựng Kế hoạch quản lý chất lượng môi trường không khí cấp tỉnh theo Công văn 3051/BTNMT-TCMT do Bộ Tài nguyên và Môi trường ban hành vào 7/6/2021. Trên cơ sở đó Luận án được tiến hành và nghiên cứu dựa trên khung logic tiếp cận của luận án trình bày ở Hình 2.1.

CHƯƠNG 2. MỤC TIÊU, ĐỐI TƯỢNG, PHẠM VI VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Mục tiêu, đối tượng và phạm vi nghiên cứu

2.1.1. Mục tiêu nghiên cứu

Mục tiêu chính của Luận án là nghiên cứu được diễn biến và các đặc điểm hóa - lý của bụi $PM_{2.5}$ trong môi trường không khí trên địa bàn thành phố Biên Hòa, tỉnh Đồng Nai.

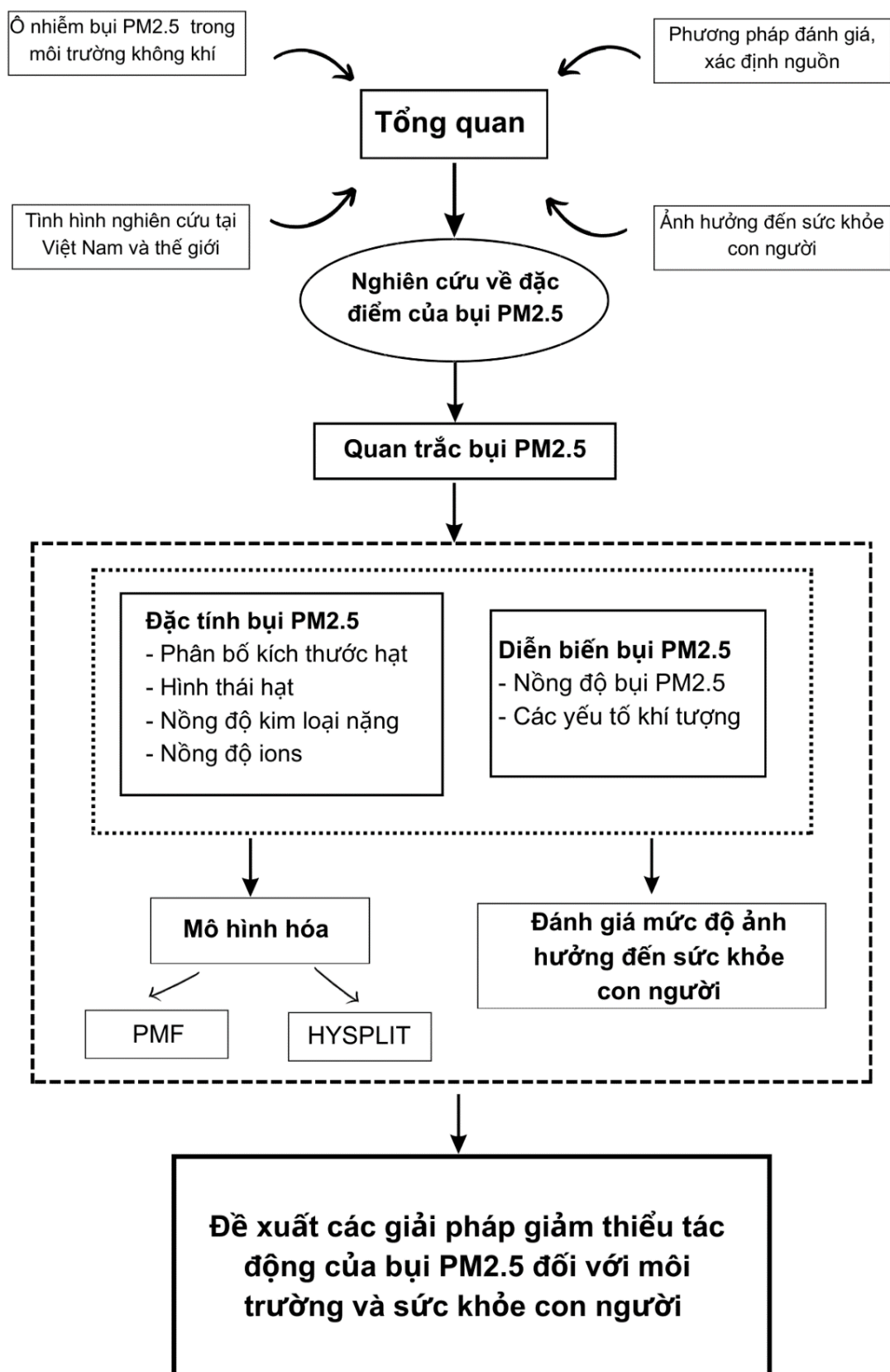
Để đạt được mục tiêu chính nêu trên, một số *mục tiêu cụ thể* của Luận án được đặt ra như sau:

- Quan trắc và xác định được diễn biến nồng độ bụi $PM_{2.5}$ trong không khí trên địa bàn thành phố Biên Hòa, tỉnh Đồng Nai.
- Phân tích được các đặc trưng vật lý (*nồng độ, phân bố cấp hạt*) và các đặc trưng hóa học (*các nguyên tố, ions bám dính*) của bụi $PM_{2.5}$.
- Ứng dụng công cụ mô hình hóa (*HYSPLIT, PMF*) để mô phỏng được quỹ đạo di chuyển và xác định cụ thể các nguồn thải tiềm năng đóng góp hàm lượng bụi $PM_{2.5}$ đến CLKK khu vực thành phố Biên Hòa, tỉnh Đồng Nai.
- Đóng góp cơ sở khoa học và thực tiễn vào công tác bảo vệ môi trường không khí, phục vụ chương trình không khí sạch địa phương và quốc gia; Qua đó góp phần nâng cao chất lượng cuộc sống cộng đồng tại khu vực nghiên cứu.

2.1.2. Đối tượng nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu của Luận án là bụi $PM_{2.5}$, các nguyên tố và ions trong bụi $PM_{2.5}$ ở khu vực thành phố Biên Hòa, tỉnh Đồng Nai.

Khung logic vấn đề nghiên cứu của Luận án được mô tả theo sơ đồ như Hình 2.1.



Hình 2. 1: Khung logic tiếp cận nghiên cứu của Luận án.

2.1.3. Phạm vi nghiên cứu

- *Phạm vi không gian:* Khu vực nghiên cứu được thực hiện trên địa bàn thành phố Biên Hòa, Tỉnh Đồng Nai.
- *Phạm vi thời gian:* Thời gian nghiên cứu của Luận án được thực hiện từ 2020 đến 2024.
- *Phạm vi chủ đề nghiên cứu:* Luận án tập trung tìm hiểu về diễn biến nồng độ, hình dạng, kích thước của bụi mịn $PM_{2.5}$ và nồng độ các nguyên tố, ions có trong hạt bụi $PM_{2.5}$. Đồng thời sử dụng các mô hình công cụ mô hình hóa bao gồm: mô hình HYSPLIT để xác định quỹ đạo di chuyển của bụi $PM_{2.5}$ ảnh hưởng đến nồng độ bụi mịn tại khu vực nghiên cứu; Mô hình PMF để xác định nguồn đóng góp bụi $PM_{2.5}$ trên địa bàn nghiên cứu.

2.2. Các phương pháp nghiên cứu

2.2.1. Phương pháp tổng hợp tài liệu

Trong quá trình nghiên cứu về bụi mịn $PM_{2.5}$, việc thu thập và tổng hợp tài liệu từ các công trình khoa học, báo cáo kỹ thuật và các nguồn thông tin đáng tin cậy trong và ngoài nước đóng vai trò hết sức quan trọng. Đây là bước nền tảng giúp hình thành nên cơ sở lý luận vững chắc, định hướng rõ ràng cho các nội dung nghiên cứu chuyên sâu sau này.

Các tài liệu được thu thập tập trung vào những nội dung chính bao gồm: khái niệm và định nghĩa $PM_{2.5}$; đặc điểm vật lý – hóa học của bụi mịn; nguồn gốc phát sinh từ tự nhiên và con người; hiện trạng ô nhiễm $PM_{2.5}$ ở các khu vực đô thị lớn; xu hướng biến động nồng độ theo thời gian và không gian; các yếu tố khí tượng, địa lý và nhân sinh ảnh hưởng đến sự phân bố và tích tụ bụi mịn; cùng với đó là các phương pháp khoa học hiện đại được sử dụng để xác định nguồn gốc phát thải bụi $PM_{2.5}$, phân tích hóa học thành phần nguyên tố, ions.

Việc tổng hợp các nghiên cứu quốc tế và trong nước không chỉ giúp người nghiên cứu có cái nhìn toàn diện và hệ thống về vấn đề mà còn cung cấp nền tảng khoa học để lựa chọn được hướng tiếp cận phù hợp. Đặc biệt, đây là một phương pháp nghiên

cứu có tính hiệu quả cao về mặt chi phí và thời gian, vì người nghiên cứu có thể khai thác được từ các công trình đã công bố mà không cần đầu tư ngay vào thí nghiệm hoặc điều tra thực địa. Đồng thời, phương pháp này còn giúp nhận diện những điểm mạnh và điểm yếu từ các nghiên cứu trước đó, từ đó định hình rõ ràng hơn mục tiêu, câu hỏi và phạm vi của luận án.

Thông qua việc nghiên cứu và tổng hợp các tài liệu trong và ngoài nước, luận án sẽ xây dựng được cơ sở khoa học vững chắc để lý giải bản chất của ô nhiễm bụi mịn $PM_{2.5}$ trong môi trường đô thị, làm rõ đặc điểm, nguồn gốc và các yếu tố ảnh hưởng – từ đó góp phần đề xuất các giải pháp quản lý và kiểm soát hiệu quả hơn trong bối cảnh thực tiễn tại Việt Nam.

2.2.2. Phương pháp quan trắc mẫu bụi $PM_{2.5}$

Yêu cầu về chiều cao vị trí lấy mẫu: Đầu lấy mẫu phải đặt được đặt từ độ cao 2 - 15m từ mặt đất cho tất cả các khu vực quy mô lớn [127]. Vị trí đặt mẫu được xác định dựa trên các điều kiện đảm bảo bao gồm: Khoảng cách vị trí đặt mẫu đến các vật cản và khoảng cách đến cây xung quanh vị trí lấy mẫu.

- Khoảng cách vị trí đặt mẫu đến các vật cản: Các tòa nhà cao tầng hoặc các vật cản khác có thể làm ảnh hưởng đến nồng độ của bụi trong thời gian lấy mẫu tại khu vực nghiên cứu. Để tránh các ảnh hưởng này, vị trí lấy mẫu phải được đặt ở vị trí không bị hạn chế bởi dòng khí. Trong trường hợp, có quá nhiều các chướng ngại vật thì vị trí này cần đặt cách xa các chướng ngại vật.

- Khoảng cách đến cây xung quanh: Cây có thể cung cấp bề mặt hấp thụ và hấp phụ các chất ô nhiễm trong quá các dòng khí mang đến. Qua đó cây cũng được xác định là vật cản khi nó đứng giữa nguồn thải và vị trí quan trắc. Để giảm thiểu tác động này, vị trí lấy mẫu cũng phải được đặt ở vị trí không có cây cao hoặc đặt cách cây vị trí tối thiểu là 10m.

Sau khi khảo sát tình hình thực tế vị trí lấy mẫu được đặt trên nóc nhà dân ở độ cao khoảng 10m so với mặt đất các vị trí này đều thỏa mãn các yêu cầu về độ cao vị trí đặt mẫu, khoảng cách vật cản, khoảng cách đến các cây xung quanh và đặc biệt đảm bảo về độ an toàn của máy trong suốt thời gian thực hiện nghiên cứu. Quy trình

thực hiện của từng mẫu đảm bảo tuân thủ thực hiện như Hình 2.3. Lắp đặt thiết bị xong, thiết bị sẽ lấy mẫu theo từng ngày. Sau mỗi ngày lấy mẫu sẽ tiến hành thu mẫu và thay giấy lọc mới, liên tục như vậy cho tới khi kết thúc lấy mẫu. Trong quá trình lấy mẫu cần quan sát các điều kiện xung quanh ảnh hưởng tới việc lấy mẫu. Tất cả những ảnh hưởng hay những điều kiện ngoại cảnh bất thường đều phải ghi lại vào nhật ký lấy mẫu để từ đó đánh giá kết quả mẫu bụi thu được chính xác hơn. Các mẫu bụi PM_{2.5} được thu nhận bằng máy lấy mẫu bụi thể tích lớn TE-1000DBLX (Tisch Environment, Inc.) (Hình 2.2), tốc độ dòng khí hút vào 175 L/phút trong thời gian là 24 giờ/mẫu với tổng thể tích là 250 m³/mẫu, mẫu bụi được thu thập bằng giấy lọc thạch anh (Quartz) có đường kính 102 mm, đảm bảo độ bền nhiệt và khả năng giữ mẫu cao.



Hình 2. 2: Máy lấy mẫu thể tích lớn TE -1000DBLX



Trước khi ra hiện trường giấy lọc được cân trên thiết bị Mettler Toledo XS205 trong phòng thí nghiệm và được bảo quản trong đĩa Pettri để trong túi zip



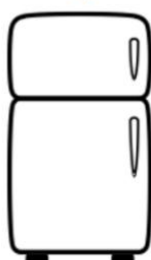
Tiến hành lấy mẫu trên thiết bị thể tích lớn TE-1000DBLX kèm theo phụ kiện TE 1008 -9 -2.5



Sau thời gian 23h30p mẫu được thu ngoài hiện trường



Giấy lọc sau khi thu mẫu giấy lọc lại được để trong đĩa pettri, để trong túi zip có ký hiệu mẫu



Các mẫu đã thu sẽ được bảo quản tạm thời trong túi zip kín tại ngăn đá tủ lạnh



Các mẫu được đưa về phòng PTN tiến hành xác định các yếu tố cần nghiên cứu

Hình 2. 3: Quy trình lấy mẫu ngoài hiện trường

2.2.3. Phương pháp xác định nồng độ bụi PM_{2.5}

Việc xác định nồng độ bụi PM_{2.5} trong môi trường không khí khá đơn giản. Tuy nhiên trong thực tiễn khi cân bụi đặc biệt là các hạt bụi có kích thước và trọng lượng nhỏ chúng ta sẽ gặp các vấn đề như là trong thời gian lưu mẫu thì các vật liệu sẽ hấp thụ hơi nước và hàm lượng chúng sẽ bị thay đổi bởi điều kiện nhiệt độ và độ ẩm tương đối của môi trường do các hạt bụi và vật liệu giấy lọc có tính hấp thụ hơi nước từ ngoài môi trường. Chính vì vậy, để đảm bảo cho việc xác định trọng lượng bụi thì trước khi cân giấy lọc của các mẫu thu thập được sẽ được xử lý ở trong tủ sấy trước và sau khi đưa ra hiện trường ở nhiệt độ là 110⁰C và điều kiện môi trường ở phòng cân cũng phải được đặt trong môi trường ổn định để tránh sai số. Tổ chức Khí tượng Thế giới (WMO) đưa ra quy định đối với điều kiện phòng cân với nhiệt độ 20⁰C ± 1⁰C và độ ẩm tương đối là ~ 45%. Sau khi các điều kiện xung quanh đã đạt điều kiện trên thì các mẫu bụi đã thu thập được tiến hành xác định nồng độ PM_{2.5} bằng thiết bị cân trọng lượng Mettler Toledo XS205. Các thiết bị được kiểm định thường xuyên và bảo quản tại Phân viện Hóa - Môi trường, Trung tâm Nhiệt đới Việt Nga. Nồng độ bụi trung bình một ngày đêm (24h) được tính bằng công thức (2.1) như sau:

$$C = \frac{M_2 - M_1}{V} \quad (2.1)$$

Trong đó:

C: Nồng độ bụi trung bình một ngày đêm (µg/m³).

M₁: Khối lượng giấy lọc trước khi lấy mẫu (µg).

M₂: Khối lượng [giấy lọc + bụi PM_{2.5}] sau khi lấy mẫu (µg).

V: Tổng thể tích dòng khí lấy mẫu trong suốt thời gian lấy mẫu (m³).

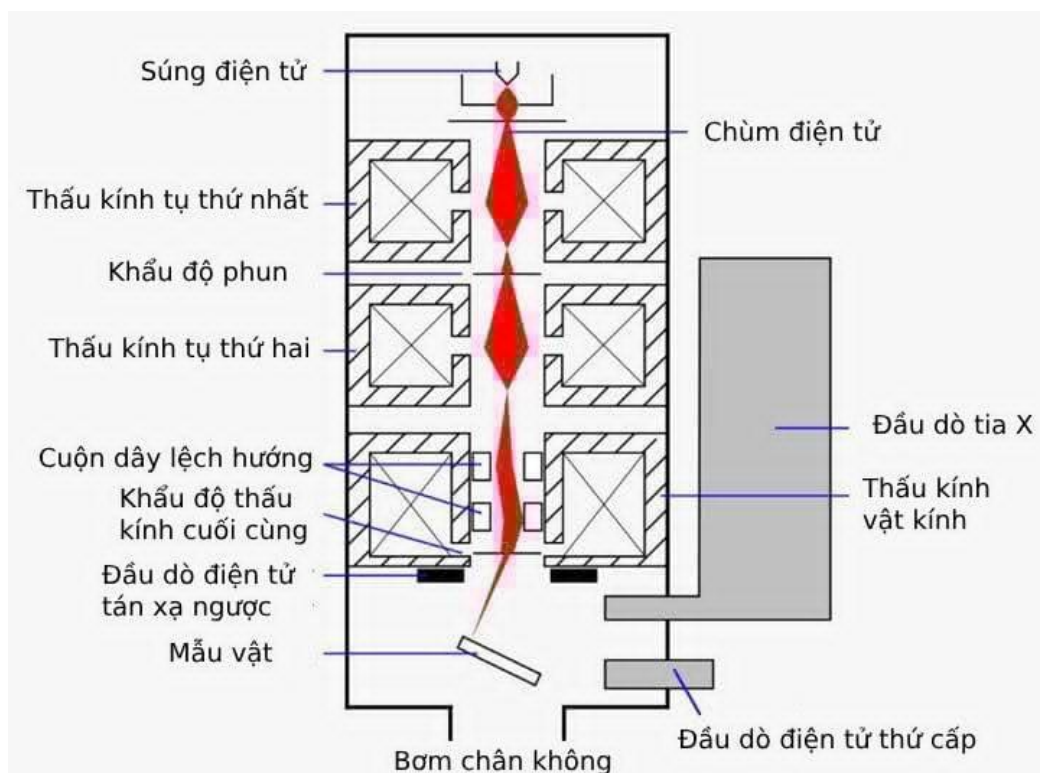
2.2.4. Phương pháp xác định phân bố kích thước hạt trong mẫu bụi PM_{2.5}

Sự phân bố kích thước hạt có trong mẫu bụi PM_{2.5} được xác định bằng phương pháp sử dụng hệ Kính hiển vi điện tử quét (Scanning Electron Microscope viết tắt là 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. Chùm điện tử sẽ tương tác với các nguyên tử nằm gần hoặc trên bề mặt mẫu sinh ra

các tín hiệu (bức xạ) chứa các thông tin về hình ảnh của bề mặt mẫu, hình dạng, kích thước... SEM lần đầu tiên được phát triển bởi nhà khoa học Zworykin vào năm 1942, là một thiết bị gồm súng phóng điện tử, ba thấu kính tĩnh điện và hệ thống các cuộn quét điện tử đặt giữa thấu kính thứ hai và thứ ba và ghi nhận chùm điện tử thứ cấp bằng một ống nhân quang điện. Đây là phương pháp tốt để nghiên cứu về các đặc điểm bề mặt của vật liệu dựa trên nguyên tắc tạo ra ảnh từ các điện tử phát xạ thứ cấp khi quét một chùm điện tử gia tốc trong điện trường có cường độ lớn và hội tụ thành một điểm lên trên bề mặt của mẫu. Khi chùm Electron đập vào bề mặt mẫu tạo thành một tập hợp các hạt thứ cấp đi tới detector, tại đây nó được chuyển thành tín hiệu điện và được khuếch đại. Các tín hiệu điện được gửi tới ống catot và được quét lên màn hình tạo nên ảnh. Độ nét của ảnh được xác định bởi số hạt thứ cấp đập vào ống tia catot và số hạt này phụ thuộc vào góc bắn ra của electron khỏi bề mặt mẫu, tức là phụ thuộc vào mức độ lồi lõm của bề mặt. Vì vậy ảnh thu được sẽ phản ánh được các hình thái học của bề mặt của vật, nguyên lý hoạt động của máy được thể hiện như Hình 2.4. Phương pháp này thường được sử dụng phổ biến trong các nghiên cứu về hướng vật liệu. Xu thế hiện nay các nhà khoa học về lĩnh vực môi trường không khí trên thế giới đã và đang có nhiều nghiên cứu chuyên sâu hơn bằng cách sử dụng các công nghệ hiện đại như chụp ảnh mẫu bụi bằng phương pháp kính hiển vi điện tử quét (Scanning Electron Microscopy, SEM) để cho kết quả chính xác, tin cậy ở mức cao hơn [70, 108, 110, 125].

Trong nghiên cứu này, để quan sát hình dạng và xác định số lượng hạt trong các mẫu bụi PM_{2.5}, phương pháp SEM đã được sử dụng. Quá trình phân tích được thực hiện bằng thiết bị SEM model S-4800 (Hitachi, Tokyo, Nhật Bản) tại Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam (VAST). Các hình ảnh SEM được chụp ở nhiều độ phóng đại khác nhau nhằm thu thập thông tin chi tiết về hình thái bề mặt và sự phân bố kích thước hạt. Sau đó, dữ liệu hình ảnh được xử lý và phân tích bằng phần mềm ImageJ, trong đó quá trình nhận diện hạt bao gồm chuyển đổi ảnh sang thang xám, thiết lập thang đo theo thanh tỷ lệ, áp dụng phương pháp phân ngưỡng (thresholding) và sử dụng công cụ Analyze Particles để đo kích thước, diện tích và

hình dạng hạt. Dữ liệu thu được giúp đánh giá đặc điểm hình thái học của bụi $PM_{2.5}$ một cách khách quan, đồng thời cung cấp thông tin quan trọng phục vụ các phân tích và so sánh trong nghiên cứu về chất lượng không khí.



Hình 2. 4: Nguyên lý hoạt động của kính hiển vi điện tử quét SEM.

2.2.5. Xác định tính chất hóa học của bụi $PM_{2.5}$

2.2.5.1. Xác định nồng độ ions

Trong số nhiều thành phần, các ion vô cơ chiếm một phần đáng kể trong khối lượng khô $PM_{2.5}$, dao động từ 17 đến 74% tùy thuộc vào vị trí. Các ion vô cơ chính hòa tan trong nước là sunfat (SO_4^{2-}), nitrat (NO_3^-) và amoni (NH_4^+), trong khi các ion phụ bao gồm natri (Na^+), clorua (Cl^-), kali (K^+), magie (Mg^{2+}) và canxi (Ca^{2+}) [150]. Do đó trong nghiên cứu này Luận án thực hiện xác định các ions trên bằng phương pháp sắc ký ion:

Sắc ký ion (ion chromatography) là một dạng của sắc ký lỏng sử dụng nhựa trao đổi ion để tách các ion dựa trên sự tương tác của các ion với nhựa. Ứng dụng nhiều

nhất của sắc ký ion là xác định các anion. Sắc ký ion cũng được sử dụng để xác định các cation và các dạng hợp chất hóa sinh như amino acid và protein.

Sắc ký ion với đầu dò độ dẫn kết hợp với bộ triệt ion nâng cao độ nhạy và độ chính xác của phương pháp. Do đó đây là phương pháp thuận tiện và đáng tin cậy để xác định nồng độ thấp các anion vô cơ trong nước.

Xác định anion bằng phương pháp sắc ký ion có thể ứng dụng cho phân tích mẫu nước uống, nước mặt, nước ngầm, nước mưa hoặc phân tích các anion hòa tan trong mẫu bụi không khí.

Quy trình xác định thành phần ion của mẫu bụi được thực hiện theo các bước chính là chiết mẫu và phân tích mẫu [13]. Quy trình chiết mẫu được thực hiện như sau:

- Lấy $\frac{1}{4}$ giấy lọc cắt nhỏ, cho vào ống phá và ký hiệu mẫu để phân biệt giữa các mẫu (sử dụng ống nhựa 10ml sạch khô)
- Lấy mẫu giấy bụi thu được cho vào trong ống, sau đó thêm 10ml nước cất 2 lần đã lọc qua màng lọc 0,45 μ m.
- Mang ống mẫu thu được đi siêu âm trong thời gian 30 phút, mục đích rung siêu âm làm hòa tan hoàn toàn các ion từ bụi trên giấy lọc và nước.
- Sau khi siêu âm ống mẫu xong, sử dụng màng lọc 0,45 μ m để hút mẫu cho vào ống đựng trong khay mẫu (ghi rõ thứ tự các mẫu đựng trong khay mẫu để tránh nhầm lẫn số liệu).

Nguyên tắc: Phân tích ion được thực hiện bằng máy sắc ký ion IC Vp10 Shimadzu. Phát hiện cation được thực hiện trên cột Shim Park SC. Pha động là dung dịch HNO₃ 0,02 mol/L, ở tốc độ dòng 0,75 ml/ phút. Anion được phát hiện bằng cách sử dụng cột tách Shim Park SA. Pha động là hỗn hợp dung dịch 1mmol/L Na₂CO₃ và 2,7 mmol/L NaHCO₃ với tốc độ dòng 0,75ml/phút.

2.2.5.2. Xác định nồng độ kim loại

Phương pháp khối phổ - cảm ứng cao tần plasma (ICP – MS) là một kỹ thuật phân tích được sử dụng để xác định đa nguyên tố và chúng có thể phát hiện được hầu hết các nguyên tố trong bảng tuần hoàn. Ngay từ khi được thương mại hóa cách đây

20 năm, ICP - MS đã trở thành một thiết bị được sử dụng rộng rãi, trong cả những phân tích thường ngày và cho nghiên cứu ở nhiều lĩnh vực khác nhau. ICP - MS là một kỹ thuật linh động có nhiều điểm mạnh hơn so với các kỹ thuật phân tích nguyên tố truyền thống, kể cả Quang phổ Phát xạ Nguyên tử nguồn cảm ứng cao tần Plasma (ICP-AES) và Quang phổ Hấp thụ Nguyên tử (AAS). Giới hạn phát hiện tương đương hoặc nhỏ hơn giới hạn phát hiện của AAS Lò Graphite nhưng có nhiều ưu điểm hơn. ICP - MS là một kỹ thuật nhanh, đa nguyên tố và thường có công suất như ICP - AES nhưng có khả năng phát hiện tốt (thấp) hơn nhiều

Phương pháp phân tích thành phần nguyên tố trong nghiên cứu này được thực hiện bởi hai bước chính, bao gồm phá mẫu và phân tích bằng thiết bị ICP - MS. Quy trình phá mẫu được thực hiện theo phương pháp IO - 3.1 [39]. Quy trình phá mẫu được thực hiện như sau:

- Cắt nhỏ 1/2 mẫu cho vào ống phá mẫu teflon và bổ sung 10 ml dung dịch phá mẫu bằng hỗn hợp axit (5,55% HNO_3 /16,75% HCl).
- Đưa ống phá mẫu vào thiết bị lò vi sóng MLS - ETHOS UP để đẩy nhanh quá trình phá mẫu. Mẫu được đẩy nhanh quá trình phá mẫu với tổng thời gian là 35 phút và ở nhiệt độ 180°C .
- Rửa thành ống phá mẫu bằng nước cất đề ion. Sau đó cho thêm 10 ml nước cất rồi để yên ít nhất 30 phút. Bước này không nên bỏ qua vì axit sẽ khuếch tán vào giấy lọc, giúp cho quá trình rửa được hiệu quả.
- Lọc dung dịch vào các ống định mức bằng giấy lọc $0,45\ \mu\text{m}$. Đóng chặt nắp ống và bảo quản lạnh đến khi phân tích.
- Lọc dung dịch mẫu vừa chiết với màng lọc $0,2\ \mu\text{m}$

Dung dịch thu được sau khi phá mẫu được đem đi phân tích trên thiết bị ICP - MS theo phương pháp IO - 3.5 [15] tại phòng thí nghiệm phân tích Môi trường - Phân viện Hóa Môi trường Trung tâm Nhiệt đới Việt Nga.

2.2.6. Phương pháp mô hình nguồn tiếp nhận

2.2.6.1. Mô hình HYSPLIT

Mô hình tích hợp quỹ đạo hạt đơn theo hướng Lagrangian (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model - HYSPLIT) là một trong những mô hình đánh giá nguồn tiếp nhận được đánh giá cao bởi các nhà khoa học và thường xuyên được sử dụng trong các nghiên cứu mô phỏng quỹ đạo di chuyển của các chất gây ô nhiễm [33, 48, 51, 72]. Mô hình CLKK là công cụ số được sử dụng để mô tả mối quan hệ nhân quả giữa phát thải, khí tượng học, nồng độ khí quyển, lắng đọng, và các yếu tố khác. Trong mô hình này chúng có thể phần nào cho chúng ta biết được quỹ đạo di chuyển của các khối không khí qua đó phần nào có xác định được các nguồn ở tầm xa đã ảnh hưởng đến CLKK đối với khu vực nghiên cứu. Vì thế trong nghiên cứu này, mô hình HYSPLIT được phát triển bởi Phòng thí nghiệm tài nguyên không khí (ARL) của Cơ quan Quản lý Đại dương và Khí quyển Quốc gia (NOAA) là một hệ thống hoàn chỉnh để tính toán quỹ đạo không gian đơn giản, cũng như sự vận chuyển, phân tán, chuyển đổi hóa học phức tạp và mô phỏng lắng đọng. HYSPLIT có thể xác định nguồn tiềm năng và phân tích phân tán quỹ đạo ngược đã được áp dụng. Mô hình được thực hiện thông qua câu lệnh Code được xây dựng trên phần mềm SplitR trong Rstudio có tích hợp với phần mềm HYSPLIT.

Cụ thể trong nghiên cứu này, Mô hình HYSPLIT được sử dụng để khảo sát quỹ đạo ngược của sự phân tán bụi $PM_{2.5}$ qua vị trí lấy mẫu khảo sát với thời gian 96 giờ ở độ cao điểm tiếp nhận là 100m. Dữ liệu khí tượng được sử dụng phân tích này là dữ liệu khí tượng NCEP/NCAR được phân tầng theo chiều dọc theo mười bảy mức áp suất (10 -1000 hPa) và xếp chồng lên nhau theo chiều ngang trên lưới kinh độ - vĩ độ chiếu toàn cầu $2,5^0$ với độ phân giải thời gian là 6 giờ trong khoảng thời gian khảo sát ở hai mùa (mùa mưa và mùa khô) được thực hiện. Gần đây, bộ dữ liệu khí tượng phân tích lại NCEP/NCAR đã được nhiều công trình tương tự trong khu vực sử dụng. [29, 115, 138]. Để xác định nguồn gốc khối khí đã ảnh hưởng đến khu vực trong thời gian thực hiện thu thập các mẫu thì phương pháp phân tích quỹ đạo ngược có trọng

số nồng độ (Concentration Weighted Trajectory - CWT) và phân tích cụm quỹ đạo (Trajectory Clustering) đã được sử dụng.

Seibert và cộng sự (1994) đã đề xuất phương pháp ước tính dựa trên các quỹ đạo và nồng độ để xác định các khu vực nguồn của chất ô nhiễm. Cách tiếp cận này được gọi là trọng số nồng độ (CWT). CWT được định nghĩa là nồng độ trung bình logarit của một loại chất gây ô nhiễm và được tính bằng phương trình sau (Phương trình 2.2):

$$\ln(C_{ij}) = \frac{1}{\sum_{k=1}^N \tau_{ijk}} \sum_{k=1}^N \ln(C_k) \tau_{ijk} \quad (2.2)$$

Trong đó: (i,j) là tọa độ của ô lưới, k là chỉ số quỹ đạo khối khí, N là tổng số khối khí được sử dụng để phân tích và C_k là nồng độ chất ô nhiễm được tính dựa trên quỹ đạo ngược k và τ_{ijk} là thời gian lưu của quỹ đạo k tại ô lưới (i, j). C_{ij} cao có nghĩa khối khí đi qua ô lưới (i,j) trung bình sẽ gây ra nồng độ cao tại vị trí tiếp nhận.

Phương pháp phân tích cụm quỹ đạo đã sử dụng phần mềm R (phiên bản 4.2.1) và các gói thư viện sử dụng để trích xuất các cụm riêng biệt bằng cách sử dụng các lệnh trong thư viện của openair để tiến hành phân tích cụm trên quỹ đạo quay lại để nhóm các nguồn gốc khối lượng không khí tương tự lại với nhau thành một cụm. Để xác định các khối khí tương đồng nhau dựa trên phương trình Euclidean (2.3):

$$d_{1,2} = \left(\sum_{i=1}^n ((X_{1i} - X_{2i})^2 + (Y_{1i} - Y_{2i}))^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.3)$$

Trong đó:

X_1, Y_1 và X_2, Y_2 là kinh độ và vĩ độ của quỹ đạo 1 và 2.

N là số điểm quỹ đạo được truy ngược quay lại.

Phương pháp rất hữu ích khi sử dụng phân tích cụm quỹ đạo ngược để nhóm các nguồn gốc khối khí tương tự lại với nhau. Mục đích chính của việc phân cụm quỹ đạo ngược là xử lý dữ liệu theo nguồn gốc cụm, bằng cách nhóm dữ liệu có nguồn gốc địa lý tương tự, có thể thu được thông tin về các chất ô nhiễm có lịch sử hóa học tương tự.

2.2.6.2. Mô hình PMF

Để nhận diện nguồn phát sinh các chất gây ô nhiễm và định lượng phần đóng góp của chúng, các mô hình thống kê áp dụng cho vị trí quan trắc – địa điểm đặt thiết bị thu mẫu đều phải dựa vào quy luật bảo toàn khối lượng (hàm lượng bụi khó trong mẫu thu góp tại vị trí quan trắc phải bằng tổng hàm lượng bụi khí từ các nguồn thành phần khả dĩ đóng góp vào) và được thể hiện theo phương trình:

$$x_{ij} = \sum_{k=1}^p a_{ik} f_{kj} \quad (i = 1 \div n, j = 1 \div m, k = 1 \div p)$$

Trong đó: a_{ik} (ng/mg) là phần khối lượng của nguồn k đóng góp vào mẫu thứ i
 f_{kj} (mg/m³) là phần khối lượng của nguyên tố thứ j trong nguồn k
 p là số nguồn thành phần

Mô hình phân tích thừa số ma trận dương (Positive Matrix Factorization - PMF) là một trong những phương pháp được sử dụng rộng rãi trên thế giới trong việc xác định nguồn thải của chất ô nhiễm trong môi trường. Mô hình được vận hành với bộ dữ liệu đầu vào bao gồm kết quả phân tích thành phần hóa lý của bụi (Concentration) và độ không đảm bảo đo (Uncertainty).

- Đối với dữ liệu trong của bộ Concentration trong nghiên cứu này bao gồm: Nồng độ bụi PM_{2.5}, Nồng độ các nguyên tố và nồng độ các ion có trong bụi PM_{2.5}.
- Đối với dữ liệu độ không đảm bảo đo bao gồm: Các số liệu được tính toán dựa trên độ bất định tương ứng của nồng độ bởi sự sai số của phép phân tích, giới hạn của phát hiện của thiết bị phân tích.

Dữ liệu Uncertainty theo hướng dẫn của mô hình thì các phép tính không được sử dụng số 0 và số âm đối với giới hạn phát hiện. Nếu nồng độ đo được nhỏ hơn hoặc bằng giới hạn phát hiện (MDL) thì độ không đảm bảo đo được tính bằng phương trình [102]:

$$Unc = \frac{5}{6} \times MDL \quad (2.4)$$

Nếu nồng độ của chất đo được lớn hơn giới hạn phát hiện (MDL) tương ứng thì dữ liệu độ không đảm bảo đo sẽ được tính dựa trên phương trình [102]:

$$Unc = \sqrt[2]{(Error\ Fraction \times concentration)^2 + (0,5 \times MDL)^2} \quad (2.5)$$

Ban đầu, toàn bộ các dữ liệu phân tích sẽ được xem xét trong quá trình phân tích PMF. Sau đó, từng thông số sẽ được đánh giá theo ba mức “Mạnh”, “Yếu” và “Xấu” dựa vào tỷ số signal/noise (S/N). Paatero và Hopke đã giới thiệu cách đánh giá các thông số này như sau [55]:

Biến được coi là “Mạnh” nếu tỷ số $S/N > 2$

Biến được coi là “Yếu” khi $0,2 < S/N < 2$

Biến được coi là “Xấu” khi $S/N < 0,2$

Sau đó, các biến “Xấu” sẽ bị loại ra khỏi mô hình. Thông số Q là một thông số đánh giá cho kết quả đầu ra của mô hình PMF, có 2 giá trị Q: Q (true) và Q (robust). Kết quả tốt nhất từ PMF khi Q (robust) đạt giá trị nhỏ nhất trong các lần chạy

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(\frac{x_{ij} - \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj}}{u_{ij}} \right)^2 \quad (2.6)$$

PMF 5.0 là phiên bản mới nhất do US. EPA cung cấp. Dữ liệu đầu vào gồm dữ liệu nồng độ chất phân tích của các mẫu và không đảm bảo đo (uncertainty-u) của mẫu. Kết quả thu được sau 20 lần chạy để lấy số nhân tố tối ưu, và 100 lần chạy để ổn định dữ liệu nguồn thải và tỷ lệ đóng góp giữa các nguồn thải.

2.2.7. Xác định hệ số làm giàu

Hệ số làm giàu (Enrichment Factor - EF) được xác định nhằm đánh giá mức độ tích lũy của các nguyên tố hóa học trong môi trường so với nền tự nhiên, từ đó phân biệt nguồn gốc tự nhiên và nhân tạo của chúng. Phương pháp được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực nghiên cứu môi trường nhằm đánh giá mức độ tích lũy và nguồn gốc của các nguyên tố kim loại nặng trong các nền mẫu khác nhau. Trong môi trường đất và trầm tích, phương pháp này hỗ trợ đánh giá sự tích lũy kim loại nặng do các hoạt động khai khoáng, nông nghiệp và xử lý chất thải, qua đó xác định mức độ ô nhiễm và nguy cơ lan truyền vào hệ sinh thái. Bên cạnh đó, EF cũng được áp dụng trong nghiên cứu chất lượng nước, cho phép phân tích mức độ ô nhiễm kim loại nặng do tác động của dòng chảy công nghiệp và quá trình đô thị hóa, từ đó cung cấp cơ sở khoa học cho các biện pháp kiểm soát ô nhiễm và bảo vệ môi trường. Trong nghiên

cứu này, EF được sử dụng để xác định nguồn phát thải của kim loại nặng trong bụi PM_{2.5} giúp phân biệt sự đóng góp của kim loại nào có nguồn gốc từ nguồn tự nhiên hoặc nhân tạo [45, 66]. Nghiên cứu này đã xác định nguồn gây ô nhiễm dựa trên công thức (2.7) [30]:

$$EF = \frac{\left(\frac{E}{R}\right)_{sample}}{\left(\frac{E}{R}\right)_{Crust}} \quad (2.7)$$

Trong đó:

[E]_{sample}: Nồng độ kim loại được phân tích trong mẫu khí.

[R]_{sample}: Là yếu tố được lấy để so sánh trong mẫu khí.

[E]_{Crust}: Nồng độ kim loại xuất hiện trong lớp vỏ trái đất.

[R]_{Crust}: Là yếu tố được lấy trong nền tự nhiên được chọn làm giá trị tham chiếu

EF của kim loại là một chỉ số được sử dụng để đánh giá sự hiện diện và cường độ của các chất gây ô nhiễm do con người gây ra [43, 154]. Nguyên tố tham chiếu thường được lựa chọn dựa trên các tiêu chí như có nguồn gốc chủ yếu từ lớp vỏ Trái Đất, ít bị ảnh hưởng bởi hoạt động nhân tạo và có sự phân bố ổn định trong môi trường. Trong nghiên cứu bụi khí quyển, các nguyên tố như nhôm (Al), sắt (Fe), titan (Ti) hoặc silic (Si) thường được sử dụng làm nguyên tố tham chiếu do chúng chủ yếu có nguồn gốc khoáng vật và ít chịu tác động từ các nguồn phát thải nhân tạo. Việc tính toán EF cho phép xác định mức độ làm giàu của các nguyên tố trong môi trường không khí và phân biệt giữa các nguồn phát thải tự nhiên và nhân tạo. Mức độ làm giàu dựa trên hệ số EF được trình bày trong Bảng 2.1.

Bảng 2. 1: Phân loại mức độ làm giàu EF dựa theo phân loại của Qijun Zhang [154]

Hệ số EF	Mức độ làm giàu
EF < 10	Thấp
10 < EF < 100	Cao
100 < EF	Rất cao

2.2.8. Đánh giá rủi ro phơi nhiễm đối với sức khỏe con người

Đánh giá phơi nhiễm là một phương pháp cảnh báo rủi ro, phụ thuộc vào các yếu tố về thời gian mà con người tiếp xúc với nồng độ các chất ô nhiễm có trong môi trường. Các đối tượng phơi nhiễm thường được chia thành hai nhóm, bao gồm người lớn (từ 12 tuổi trở lên) và trẻ con (dưới 12 tuổi) [21, 58]. Do nghiên cứu này đang xem xét nồng độ các chất ô nhiễm có trong môi trường không khí, vì vậy mức độ rủi ro được đánh giá thông qua sự phơi nhiễm qua con đường hô hấp và tiếp xúc da. WHO (2008) hướng dẫn đánh giá mức độ rủi ro thông qua các công thức như sau:

Nồng độ tiếp xúc qua đường hô hấp được (EC_i – đơn vị là $\mu\text{g}/\text{m}^3$) được tính bằng công thức (2.8):

$$EC_i^{inh} = \frac{CA_i \times ET \times EF \times ED}{AT} \quad (2.8)$$

Liều lượng hấp thụ qua da khi (DAD_i – đơn vị $\text{mg}/\text{kg}/\text{ngày}$) được tính bằng công thức số (2.9):

$$DAD_i^{der} = \frac{CA_i \times SA \times AF \times ABS \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT} \quad (2.9)$$

Chỉ số nguy hiểm gây ung thư (HQ) được tính toán như thể hiện trong các phương trình (2.10) - (2.11)

$$HQ_{der} = \frac{DAD_i^{der}}{RfD_i^{der} \times ABS} \quad (2.10)$$

$$\text{Tổng chỉ số nguy hiểm gây ung thư: } HI = \sum HQ_i \quad (2.11)$$

Nguy cơ gây ung thư (CR) của các kim loại độc hại thông qua ba cách tính được dựa trên các phương trình từ (2.12) – (2.14)

$$CR_{inh} = EC_i^{inh} \times IUR \quad (2.12)$$

$$CR_{inh} = \frac{DAD_i^{der} \times RfD_i^{der}}{ABS} \quad (2.13)$$

$$\text{Tổng chỉ số rủi ro ung thư: } TCR = \sum CR_i \quad (2.14)$$

Chỉ số nguy hiểm (HI) sẽ bằng tất cả các HQ của các nguyên tố cộng lại, từ đó đánh giá các tác động nguy hiểm gây tác động mãn tính của các rủi ro không gây ung thư. Khi cả hai $HQ \leq 1,0$ và $HI \leq 1,0$ thì không có nguy cơ đáng kể về các tác động mãn tính. Ngược lại, $HQs > 1$ hoặc $HI > 1$ cho thấy khả năng xuất hiện các bệnh mãn

tính [94, 158]. Giá trị nguy cơ gây ung thư TCR cho thấy khả năng bị tác nhân gây ung thư do các kim loại gây nên và được chia thành 5 bậc bao gồm: rất thấp ($TCR \leq 10^{-6}$), thấp ($10^{-6} \leq TCR \leq 10^{-4}$), trung bình ($10^{-4} \leq TCR \leq 10^{-3}$), cao ($10^{-3} \leq TCR \leq 10^{-1}$) và rất cao $TCR \geq 10^{-1}$ [155]. Các hằng số được sử dụng cho việc đánh giá rủi ro sức khỏe con người tại khu vực nghiên cứu được lựa chọn trên cơ sở tham khảo, đối chiếu và tổng hợp từ các công trình nghiên cứu trước đây, có xét đến nghiên cứu có cùng đặc điểm về khu vực, điều kiện khí hậu cũng như sự tương đồng về thể trạng của người dân địa phương. Các giá trị được thể hiện trong Bảng 2.2:

Bảng 2. 2: Hằng số được sử dụng cho các công thức đánh giá rủi ro sức khỏe đối với người lớn và trẻ con

Ý nghĩa các nhân tố	Ký hiệu	Đơn vị	Giá trị		TLTK
			Trẻ con	Người lớn	
Tần suất tiếp xúc với môi trường	EF	ngày/năm	365	365	[113]
Thời gian phơi nhiễm	ED	năm	6	40	[113]
Hệ số chuyển đổi đơn vị	CF	kg/mg	$1,0 \times 10^{-6}$	$1,0 \times 10^{-6}$	[113]
Trọng lượng cơ thể trung bình	BW	kg	13,7	57,5	[1, 143]
Thời gian phơi nhiễm hàng ngày	ET	h/ngày	8	8	[113]
Diện tích bề mặt da	SA	cm ²	0,2	0,07	[113]
Yếu tố hấp thụ qua đường tiếp xúc	ABS	-	100%	100%	[113]
Tuổi thọ trung bình*	AT _n	Giờ	76,2 x 365 x 24	76,2 x 365 x 24	[9]
	AT	Ngày	76,2 x 365	76,2 x 365	
Hệ số rủi ro gây ung thư do tiếp xúc qua da	RfD_i^{der}	-	Bảng 3.12	Bảng 3.12	
Hệ số rủi ro gây ung thư qua con người hít thở	IUR	-	Bảng 3.12	Bảng 3.12	
Nồng độ được xác định của nguyên tố i	CA_i	Nồng độ các nguyên tố			

2.3. Đảm bảo chất lượng và kiểm soát chất lượng (QA/QC)

Đảm bảo chất lượng (Quality Assurance - QA) và kiểm soát chất lượng (Quality Control - QC) được thực hiện trong suốt quá trình lấy mẫu và phân tích mẫu để đảm bảo có được nguồn số liệu, dữ liệu có chất lượng, đảm bảo độ tin cậy phục vụ cho quá trình thực hiện các bước nghiên cứu tiếp theo. Cụ thể, trong nghiên cứu này công tác QA/QC được thực hiện như sau:

2.3.1. Lấy mẫu hiện trường

Tất cả các thiết bị sau khi hiệu chuẩn đều được mang ra hiện trường trước thời điểm lấy mẫu ít nhất 2 ngày để lắp đặt và chạy thử, kiểm tra các sự cố về kỹ thuật để đảm bảo quá trình lấy mẫu diễn ra thuận lợi, không bị ngắt quãng trong quá trình thu thập mẫu.

Lắp đặt thiết bị: Để đảm bảo mẫu được lấy có tính đại diện cho cả khu vực nghiên cứu, thiết bị lấy mẫu đều được đặt ở độ cao phù hợp với hướng dẫn của US. EPA [127] và vị trí tương tự các nghiên cứu khác trên thế giới. Tuân thủ các tiêu chuẩn của US. EPA về vị trí đặt máy để tránh ảnh hưởng từ vật cản. Nhật ký lấy mẫu được ghi chép cẩn thận để loại bỏ các mẫu có sự cố như mất điện, tắc nghẽn giấy lọc

Giấy lọc được chuẩn bị và cân trong các điều kiện tiêu chuẩn (SOP MDL 064 và SOP MDL 055 của Hoa Kỳ) trước khi vận chuyển đến địa điểm lấy mẫu [13, 14].

Số lượng mẫu thực đáp ứng yêu cầu của nghiên cứu chỉ định trong hướng dẫn của 2008/50/EC [185].

Mẫu thêm chuẩn giấy lọc được sấy ở 105°C trong 24 giờ và cân chính xác khối lượng đầu bằng cân phân tích. Sau đó giấy lọc được cho thêm dung dịch chuẩn: Hút chính xác 0,1 mL dung dịch chuẩn (Al, Cu, Ni, Co, Mn, Cr, Pb, Cd, NH_4^+ , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , K, Na, Mg) có nồng độ 10 ppm; As, Zn, Fe nồng độ 100 ppm. Ca nồng độ 1000 ppm. Dung dịch chuẩn được thu nhỏ đều lên bề mặt giấy lọc và để khô tự nhiên đem ra hiện trường lấy mẫu như các mẫu khác.

Các mẫu có sự cố về thiết bị, sự cố về điện đã bị loại bỏ.

2.3.2. Phân tích đặc tính hóa lý

Xác định nồng độ bụi: Giấy lọc được sấy khô ở 110°C và cân trong phòng có kiểm soát nhiệt độ ($20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$) và độ ẩm tương đối ($\sim 45\%$) theo tiêu chuẩn của WMO để đảm bảo kết quả cân chính xác, tránh sai số do độ ẩm.

Xác định đặc tính vật lý và hóa học: Phòng phân tích các tiêu chuẩn khác đều đạt chuẩn về nhiệt độ, độ ẩm và các điều kiện khác nhau theo từng chỉ tiêu phân tích. Cân tại phòng kiểm chuẩn luôn được hiệu chuẩn định kỳ. Phân tích hình ảnh SEM, ion và nguyên tố đều được thực hiện tại các phòng thí nghiệm chuyên phân tích về hóa và môi trường tại Trung tâm Nhiệt đới Việt Nga và Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam. Tiến hành phân tích mẫu trắng, mẫu lặp để loại bỏ các sai số. Mỗi đợt phân tích đều bao gồm mẫu trắng, mẫu lặp và mẫu thêm chuẩn để kiểm tra độ chính xác và độ lặp lại. Các thiết bị như ICP-MS và sắc ký ion được hiệu chuẩn định kỳ để kiểm soát độ trôi của máy và tăng độ nhạy.

Quy trình chuẩn bị mẫu và phân tích kim loại được tuân thủ nghiêm ngặt theo yêu cầu được quy định trong phương pháp tổng hợp IO-3.1 (<https://www.epa.gov/esam/epa-io-inorganic-compendium-method-io-31-selection-preparation-and-extraction-filter-material>) và phương pháp tổng hợp IO-3.5 (<https://www.epa.gov/esam/epa-io-inorganic-compendium-method-io-35-determination-metals-ambient-particulate-matter-using>) của U.S. EPA. Kỹ thuật phổ khối plasma cảm ứng (ICP-MS) (Thermo Scientific™ iCAP™ RQ ICP-MS) được sử dụng để phân tích 11 nguyên tố (As, Pb, Mn, Fe, Cd, Cr, Zn, Co, Al, Cu và Ni) trong bụi mịn $\text{PM}_{2.5}$. Tất cả các thao tác xử lý mẫu sau thu thập đều được thực hiện trong phòng thí nghiệm sạch đạt chuẩn kim loại vết, trang bị tủ hút dòng chảy tầng, để ngăn ngừa nhiễm bẩn mẫu. Các mẫu trắng cũng được đưa vào phân tích, trong đó không chứa kim loại vết nào có nồng độ nằm trong giới hạn phát hiện của thiết bị.

CHƯƠNG 3: KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

3.1. Diễn biến nồng độ bụi $PM_{2.5}$ tại thành phố Biên Hòa, tỉnh Đồng Nai

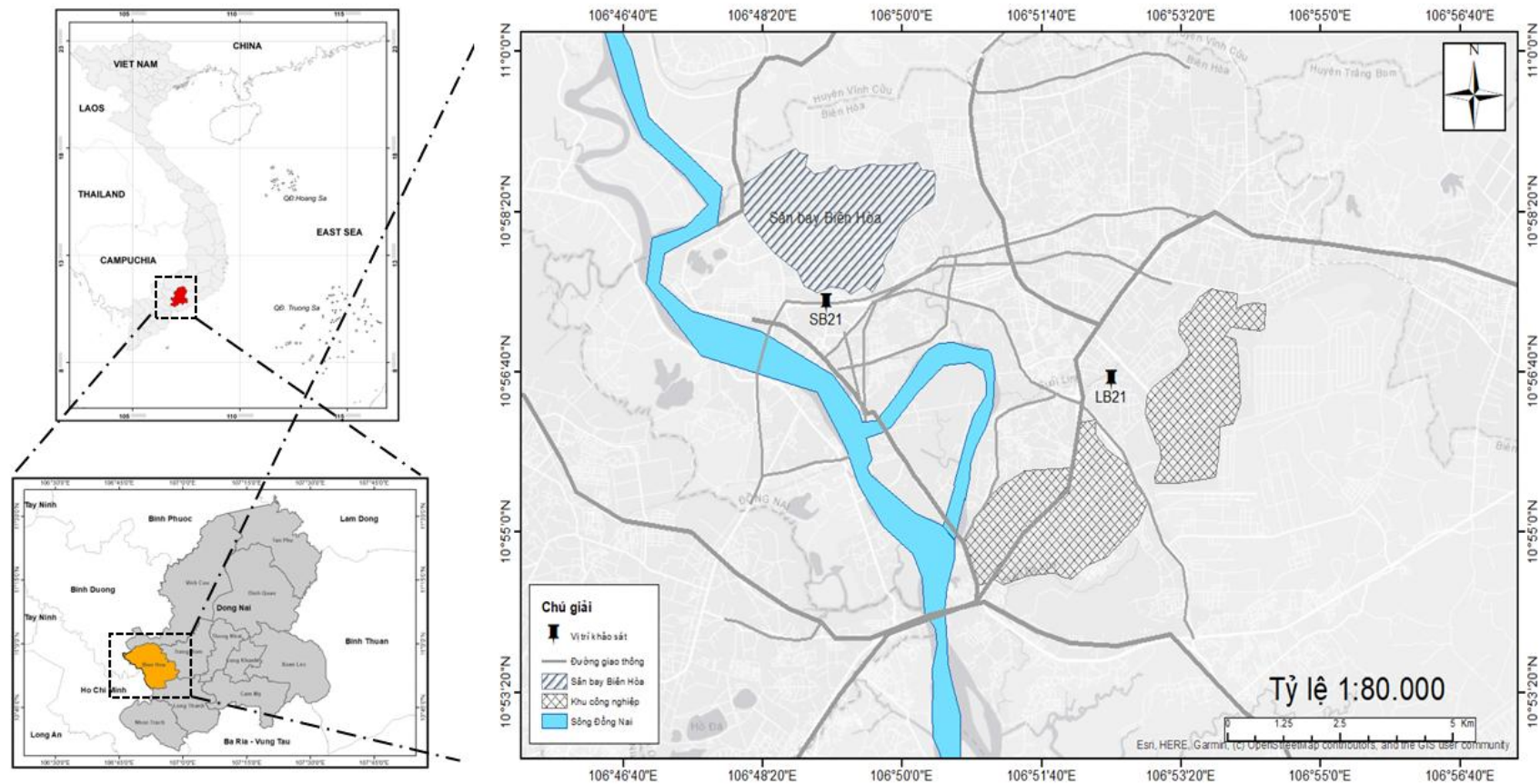
3.1.1. Chương trình quan trắc bụi $PM_{2.5}$ tại thành phố Biên Hòa, tỉnh Đồng Nai

Sau khi khảo sát tình hình thực tế vị trí lấy mẫu được đặt trên nóc nhà dân ở độ cao khoảng 10m so với mặt đất các vị trí này đều thỏa mãn các yêu cầu về độ cao vị trí đặt mẫu, khoảng cách vật cản, khoảng cách đến các cây xung quanh và đặc biệt đảm bảo về độ an toàn của máy trong suốt thời gian thực hiện. Bên cạnh đó, nghiên cứu đã cân nhắc kỹ và lựa chọn hai vị trí đại diện rõ nét nhất cho đặc trưng phát thải của đô thị Biên Hòa gồm: khu vực trung tâm đô thị - dân sinh và khu vực công nghiệp. Cụ thể các vị trí được lựa chọn đảm bảo đủ các tiêu chí bao gồm: Vị trí 1 tại khu công 2 sân bay Biên Hòa (ký hiệu mẫu là SB) và vị trí thứ 2 thuộc phường Long Bình (ký hiệu mẫu là LB), thành phố Biên Hòa nơi tập trung các KCN (hình 3.1). Chi tiết số lượng mẫu bụi $PM_{2.5}$ đã được thu thập tại 2 địa điểm theo hai mùa được trình bày cụ thể như trong bảng 3.1. Lý do cho nghiên cứu được chia làm hai đợt trong năm là do: điều kiện thời tiết đặc trưng của khu vực nghiên cứu được chia làm 2 mùa rõ rệt trong năm (mùa mưa và mùa khô) việc lấy mẫu luân phiên giữa mùa mưa và mùa khô giúp bù đắp giới hạn về số điểm, đảm bảo dữ liệu thu được vẫn có tính đại diện theo không gian và thời gian, đáp ứng yêu cầu khoa học của nghiên cứu. Cụ thể: Tháng 3 được chọn đại diện cho mùa khô của khu vực TP. Biên Hòa vì đây là giai đoạn cuối mùa khô ở Đông Nam Bộ, đặc trưng bởi lượng mưa rất thấp, độ ẩm không khí giảm, nắng nhiều và hiện tượng nghịch nhiệt thường xuất hiện, làm tăng nguy cơ tích tụ bụi mịn trong không khí. Trong khi đó, tháng 10 được lựa chọn đại diện cho mùa mưa do nằm trong thời kỳ cao điểm mưa lớn, độ ẩm cao và điều kiện khí tượng thuận lợi cho sự khuếch tán, rửa trôi các chất ô nhiễm. Việc lấy mẫu trong hai thời điểm này cho phép so sánh và đánh giá sự khác biệt rõ rệt theo mùa của nồng độ $PM_{2.5}$ và các thông số ÔNKK tại TP. Biên Hòa. Vì vậy, để có những cái nhìn đầy đủ cho Luận án nghiên cứu đã tiến hành lấy mẫu làm 2 đợt trong năm. Đối với mùa mưa được lấy từ ngày 15/10 – 31/10/2021 với tổng số mẫu thu được là 20 mẫu ở cả hai vị trí (Ký hiệu cho

các mẫu mùa này là SBM và LBM). Mùa khô được lấy từ ngày 13/3 – 30/3/2022 với tổng số mẫu thu được là 22 mẫu (Ký hiệu cho các mẫu mùa này là SBK và LBK). Tổng số mẫu thu được là 42 mẫu cho cả hai đợt có thể chưa bao trùm toàn bộ thành phố Biên Hòa, tuy nhiên với cách bố trí vị trí quan trắc này thì dữ liệu thu được đã được phân tích tương đối đầy đủ các điều kiện và đặc biệt phát thải bụi PM_{2.5} trong khu vực nghiên cứu. Song song với quá trình lấy mẫu bụi, thì các mẫu trắng nhằm kiểm soát QA/QC quá trình lấy mẫu hiện trường cũng được thực hiện. Số lượng mẫu trắng được của từng đợt cũng được đáp ứng quy định của Thông tư 10/2021/TT-BTNMT.

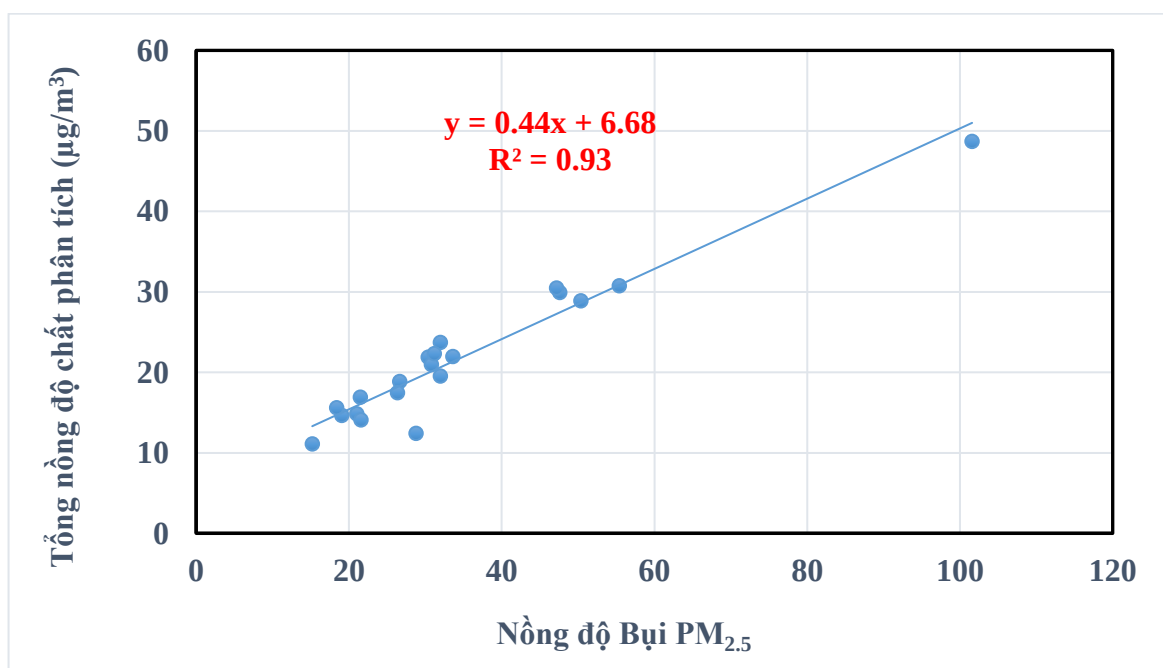
Bảng 3. 1: Vị trí nghiên cứu

Vị trí	Tọa độ	Thời gian		Số lượng mẫu	Ghi chú
		Mùa khô	Mùa mưa		
Cổng 2 sân bay Biên Hòa	Kinh độ: 10°57' 22,6"N. Vĩ độ: 106°49'06,2"E	15/10 - 31/10/ 2021	13/3 - 30/3/ 2022	20	- Chiều cao đặt mẫu: 10m so với mặt đất. - Đại diện cho khu vực dân sinh. - Thể tích lấy mẫu: 250m ³ .
Phường Long Bình, Biên Hòa	Kinh độ: 10°56'34,7"N Vĩ độ: 106°52'30,6"E	15/10 - 31/10/ 2021	13/3 - 30/3/ 2022	22	- Chiều cao đặt mẫu: 10m so với mặt đất. - Đại diện cho khu vực KCN. - Thể tích lấy mẫu: 250m ³

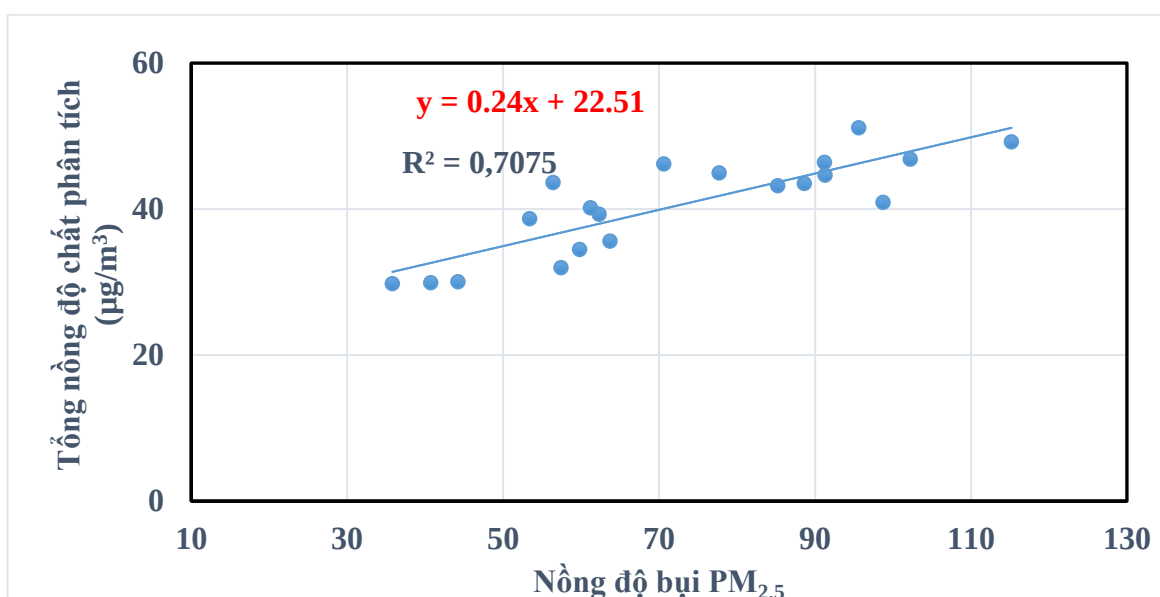


Hình 3. 1: Bản đồ vị trí lấy mẫu

Hình 3.2 và Hình 3.3 lần lượt thể hiện mối tương quan giữa nồng độ bụi và thành phần hóa học đã được phân tích trong các mẫu đã thu thập được vào mùa mưa và mùa khô trên địa bàn nghiên cứu. Dựa trên định luật bảo toàn vật chất thì tổng nồng độ các chất đã phân tích phải nhỏ hơn nồng độ bụi $PM_{2.5}$. Trong nghiên cứu này đã tiến hành phân tích 11 kim loại (Al, Fe, Zn, Cu, Cr, Pb, Mn, Ni, As, Cd, Co) và 8 ion (SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ , Na^+ , Cl^- , K^+ , Mg^{2+} và Ca^{2+}) và so sánh mối tương quan với tổng nồng độ bụi $PM_{2.5}$. Kết quả nghiên cứu cho thấy tổng nồng độ các chỉ tiêu phân tích được có mối tương quan chặt chẽ với nồng độ bụi $PM_{2.5}$, với hệ số tương quan lần lượt là 0,93 vào mùa mưa và 0,71 vào mùa khô. Điều này có nghĩa là 93% sự biến thiên của tổng nồng độ chất phân tích vào mùa mưa và 71% vào mùa khô có thể được giải thích bởi sự thay đổi của $PM_{2.5}$. Sự khác biệt về hệ số tương quan giữa hai mùa phản ánh tác động của điều kiện khí tượng đối với sự tích lũy và phát tán bụi mịn. Vào mùa mưa, lượng mưa lớn giúp làm sạch không khí, loại bỏ bụi $PM_{2.5}$ nhanh hơn, dẫn đến mối liên hệ chặt chẽ hơn giữa các thành phần hóa học và tổng nồng độ bụi. Ngược lại, vào mùa khô, sự lắng đọng ướt bị hạn chế, khiến bụi tích tụ nhiều hơn trong khí quyển, làm giảm mức độ tương quan giữa $PM_{2.5}$ và các thành phần hóa học đi kèm.



Hình 3. 2: Tương quan tổng chất phân tích và nồng độ bụi vào mùa mưa



Hình 3. 3: Tương quan tổng chất phân tích và nồng độ bụi vào mùa khô

3.1.2. Diễn biến nồng độ bụi $PM_{2.5}$

Diễn biến nồng độ các mẫu bụi $PM_{2.5}$ thu được từ hai vị trí SB và LB tại thành phố Biên Hòa, tỉnh Đồng Nai trong hai đợt khảo sát tổng hợp dưới bản được liệt kê trong Bảng 3.2.

Bảng 3. 2: Nồng độ bụi $PM_{2.5}$ ở hai vị trí nghiên cứu TP Biên Hòa, Đồng Nai

Đợt Vị trí	SB (n=10, đơn vị: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	LB (n =11, đơn vị: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Đợt 1 (mùa mưa)	28,23 $\pm$ 12,18	40,85 $\pm$ 23,55
Đợt 2 (mùa khô)	64,98 $\pm$ 17,80	78,72 $\pm$ 23,40
Trung bình	47,48 $\pm$ 24,06	60,69 $\pm$ 29,98

Có thể thấy rằng tại khu vực LB, nơi tập trung nhiều hoạt động công nghiệp, có nồng độ $PM_{2.5}$ trung bình ($60,69 \pm 29,98 \mu\text{g}/\text{m}^3$) cao hơn so với tại vị trí SB ($47,48 \pm 24,05 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Cụ thể, nồng độ trung bình của $PM_{2.5}$ tại vị trí LB ($40,85 \mu\text{g}/\text{m}^3$ và $78,72 \mu\text{g}/\text{m}^3$) cao hơn gấp 1,4 lần và 1,2 lần so với tại Sân bay Biên Hòa ($28,23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ và $64,98 \mu\text{g}/\text{m}^3$) lần lượt trong đợt 1 và đợt 2. Nồng độ $PM_{2.5}$ trong đợt 2 (mùa khô) cao hơn so với trong đợt 1 (mùa mưa) ở cả hai vị trí. Vào mùa mưa, cơ chế lắng đọng ướt do mưa là một trong những nguyên nhân chính làm giảm hàm lượng bụi trong

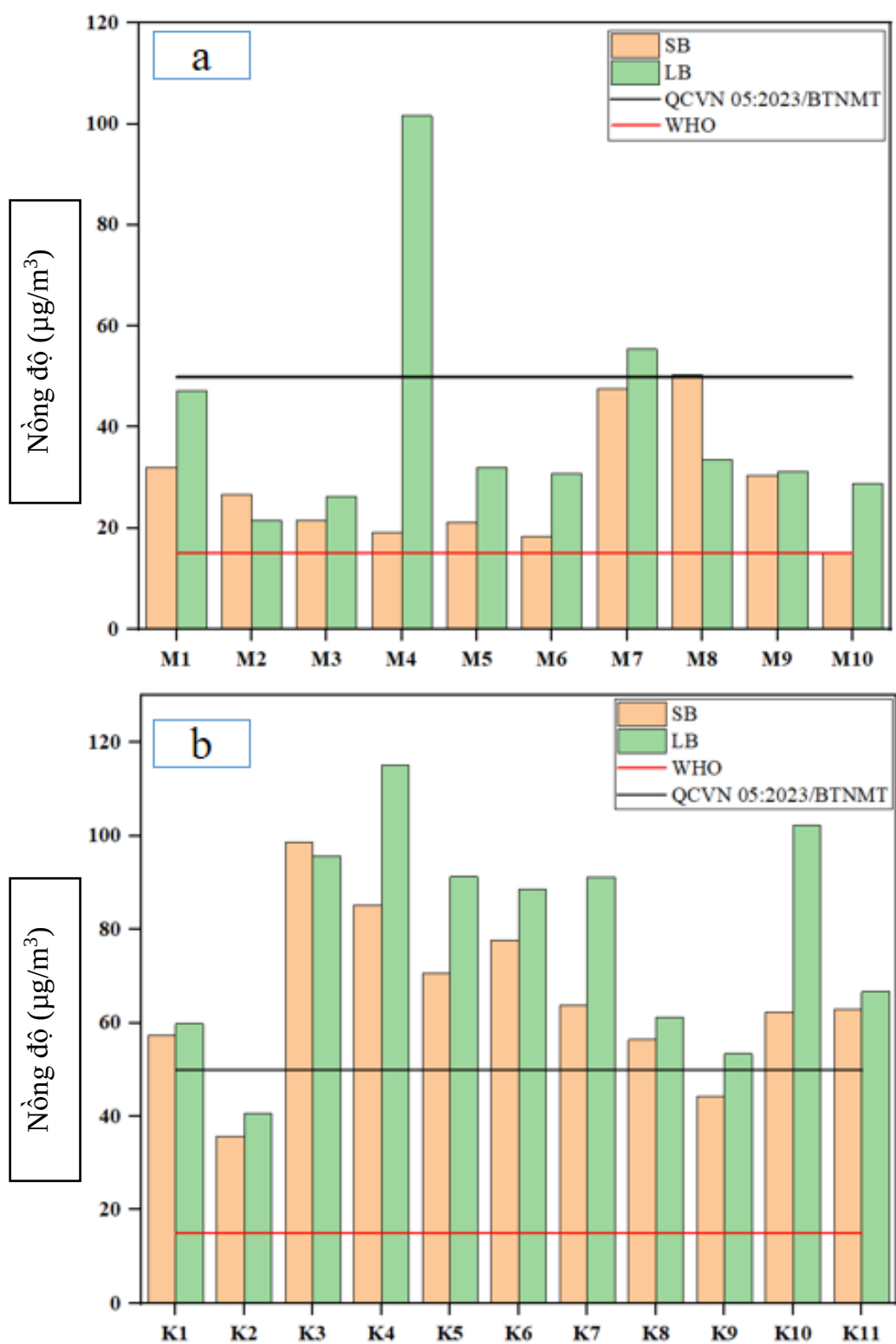
không khí. Kết quả tương tự đã được báo cáo ở thành phố HCM [52]. Cần chú ý rằng đợt lấy mẫu này diễn ra vào tháng 10/2021 là giai đoạn vẫn đang chịu ảnh hưởng sau đại dịch Covid -19 do thực trạng thiếu người lao động nghiêm trọng nên các nhà máy, các khu công nghiệp và các hoạt động dân sinh khác diễn ra còn hạn chế. Do vậy mức độ đóng góp của các nguồn ô nhiễm có phần giảm mạnh so với điều kiện bình thường cụ thể là diễn biến nồng độ bụi $PM_{2.5}$ vào tháng 3/2022 khi mà các hoạt động tại địa bàn nghiên cứu và các địa phương lân cận, đặc biệt các thành phố tập trung mật độ KCN, sản xuất công nghiệp và giao thông vận tải lớn như thành phố Hồ Chí Minh (TP. HCM), Bình Dương dần được phép hoạt động trở lại sau thời gian dài bị ảnh hưởng bởi đại dịch. Tuy nhiên, vẫn còn rất nhiều hạn chế so với điều kiện bình thường. Theo dữ liệu quan trắc tổng hợp từ IQAir, nồng độ $PM_{2.5}$ trung bình năm tại TP. Biên Hòa ước tính vào khoảng $43 \mu g/m^3$ [4]. Như vậy, giá trị trung bình của luận án nằm trong khoảng gần với kết quả quan trắc dài hạn của địa phương, phản ánh sự nhất quán giữa dữ liệu khảo sát và dữ liệu quan trắc thường xuyên. Điều này củng cố tính tin cậy của nghiên cứu và cho thấy kết quả luận án có khả năng đại diện tốt cho thực trạng ÔNKK tại khu vực nghiên cứu.

Kết quả nghiên cứu của Luận án được so sánh nồng độ $PM_{2.5}$ với TP.HCM, một thành phố lớn nhất trong khu vực phía Nam, gần địa bàn nghiên cứu của Luận án và có nhiều nghiên cứu đã được triển khai. Trong giai đoạn mùa mưa, nồng độ $PM_{2.5}$ tại khu vực nghiên cứu có nồng độ tương đồng với nồng độ tại TP.HCM, theo báo cáo của Huy và cộng sự (2018) (dữ liệu từ 2013 đến 2017: $28,0 \pm 18,1 \mu g/m^3$) [36] và Hien và cộng sự (2019) (dữ liệu từ tháng 3 năm 2017 đến tháng 3 năm 2018: trung bình 24 giờ là $33,6 \mu g/m^3$) và thấp hơn đáng kể so với giá trị được báo cáo bởi Giang và Oanh (2014) (dữ liệu từ tháng 12 năm 2007 đến tháng 1 năm 2008: $97 \pm 31 \mu g/m^3$) [174]. Tuy nhiên, trong thời gian mùa khô, nồng độ $PM_{2.5}$ cao hơn tại TP.HCM ($39,2 \mu g/m^3$, trung bình 24 giờ) [124]. Theo kết quả phân tích thống kê từ 2013 - 2017 cho thấy $PM_{2.5}$ trung bình 24 giờ tại TP.HCM có ngày lên tới $100 \mu g/m^3$.

Diễn biến theo từng ngày nồng độ bụi $PM_{2.5}$ tại hai vị trí nghiên cứu trong thời gian khảo sát được thể hiện trong Hình 3.4. Theo đó các kết quả nồng độ $PM_{2.5}$ tại

khu vực SBM (Hình 3.4a) có khoảng giao động là 15,2 - 50,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ và ở vị trí LBM, nồng độ $\text{PM}_{2.5}$ giao động lớn hơn nhiều từ 21,6 - 101,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Như vậy, trong quá trình quan trắc vào mùa mưa chỉ có duy nhất mẫu M8 (ngày 23-24/10/2021) ở vị trí SB, và mẫu M4 và M7 tại LB có giá trị vượt quá giá trị giới hạn trung bình ngày (50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) quy định trong QCVN 05:2023/BTNMT [8]. Trong mùa khô, hầu như tất cả các mẫu ở hai vị trí đều vượt quy chuẩn (trừ mẫu K2, và mẫu K9) [8] đây là hai ngày theo nhật ký ghi lại là chủ nhật nên các hoạt động sản xuất, giao thông và các nguồn gây phát sinh ra bụi $\text{PM}_{2.5}$ tại địa bàn và khu vực xung quanh cũng được tạm nghỉ. Kết quả phân tích cho thấy nồng độ bụi $\text{PM}_{2.5}$ dao động từ 35,8 đến 98,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ tại vị trí SB và từ 40,7 đến 115,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ tại vị trí LB.

Mặc dù mức ô nhiễm $\text{PM}_{2.5}$ tại Biên Hòa thấp hơn so với các đô thị lớn trong giai đoạn 2016 - 2019, khi nồng độ bụi mịn thường vượt chuẩn quốc gia từ 1,1 - 2,2 lần và có thể lên đến 3 lần trong các đợt ô nhiễm nghiêm trọng, nhưng thực tế vẫn rất đáng lo ngại [92]. Toàn bộ các mẫu quan trắc tại khu vực này đều có nồng độ $\text{PM}_{2.5}$ cao hơn 1,0 - 6,8 lần trong mùa mưa và 2,5 - 7,7 lần trong mùa khô so với giới hạn 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ do WHO (2021) khuyến nghị [192]. Nếu so sánh với tiêu chuẩn quốc gia (50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), chất lượng không khí vào mùa mưa chưa đến mức báo động, nhưng xét theo tiêu chuẩn WHO, khu vực này đã vượt xa ngưỡng an toàn. Điều đáng chú ý là đợt quan trắc diễn ra vào thời điểm hậu Covid-19, khi các hoạt động kinh tế - xã hội chưa hoàn toàn phục hồi. Dù mức phát thải có phần giảm so với giai đoạn bình thường, nồng độ $\text{PM}_{2.5}$ vẫn ở mức cao, cho thấy tình trạng ÔNKK tại Biên Hòa vẫn là vấn đề nghiêm trọng. Điều này đặt ra yêu cầu cấp thiết về các biện pháp kiểm soát hiệu quả hơn, nhằm ngăn chặn nguy cơ ô nhiễm gia tăng khi các hoạt động sản xuất, giao thông và xây dựng trở lại bình thường.



Hình 3. 4: Diễn biến nồng độ bụi $PM_{2.5}$ tại hai vị trí trong giai đoạn nghiên cứu mùa mưa (a) và mùa khô (b).

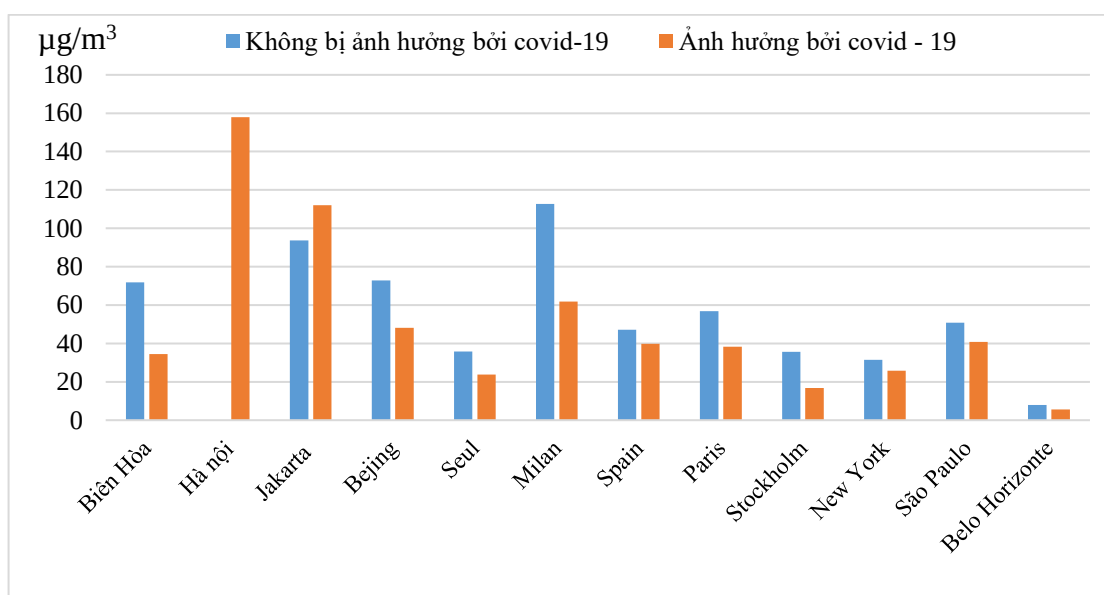
So sánh nồng độ bụi với một số nghiên cứu khác trên thế giới trong thời gian chịu ảnh hưởng bởi dịch covid - 19:

Bảng 3. 3: Bảng so sánh nồng độ bụi PM_{2.5} với các địa điểm trên thế giới trong thời gian bị ảnh hưởng bởi covid-19

Đơn vị: $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Châu lục	Địa điểm	Không ảnh hưởng của Covid-19	Ảnh hưởng Covid - 19	TLTK
Châu á	Biên Hòa	71,85 ± 21,47	34,54 ± 19,36	TNCN
	Hà nội	-	157,99	[2]
	Jakarta-Indonesia	93,72 ± 19,24	112,03 ± 17,23	[63]
	Beijing	72,78	48,11	[27]
	Seul	35,73	23,72	[27]
Châu Âu	Milan - Italia	112,75 ± 38,5	61,89 ± 18,03	[160]
	Spain (Madrid)	47,22	39,75	[18]
	Paris - France	56,87	38,38	[18]
	Stockholm - Sweden	35,67	16,73	[18]
Châu Mỹ	New York - USA	31,43	25,83	[18]
	São Paulo - Brazil	50,8	40,8	[95]
	Belo Horizonte - Brazil	8,0	5,6	[95]

Nhìn chung, tất cả các thành phố trên thế giới đều cho thấy xu hướng cải thiện chất lượng không khí khi thực hiện giãn cách xã hội và hạn chế các hoạt động sản xuất. Điều này đặc biệt rõ nét so với thời điểm bình thường, khi nồng độ bụi PM_{2.5} chịu tác động từ quá trình đô thị hóa, sự phát triển mạnh mẽ của các hoạt động kinh tế xã hội, và sự gia tăng nhanh chóng số lượng phương tiện giao thông cá nhân như xe máy và ô tô, góp phần không nhỏ vào ô nhiễm bụi PM_{2.5}. Tuy nhiên, thủ đô Jakarta - Indonesia lại phản ánh một xu hướng ngược lại, điều này được lý giải là do sự biến đổi theo mùa

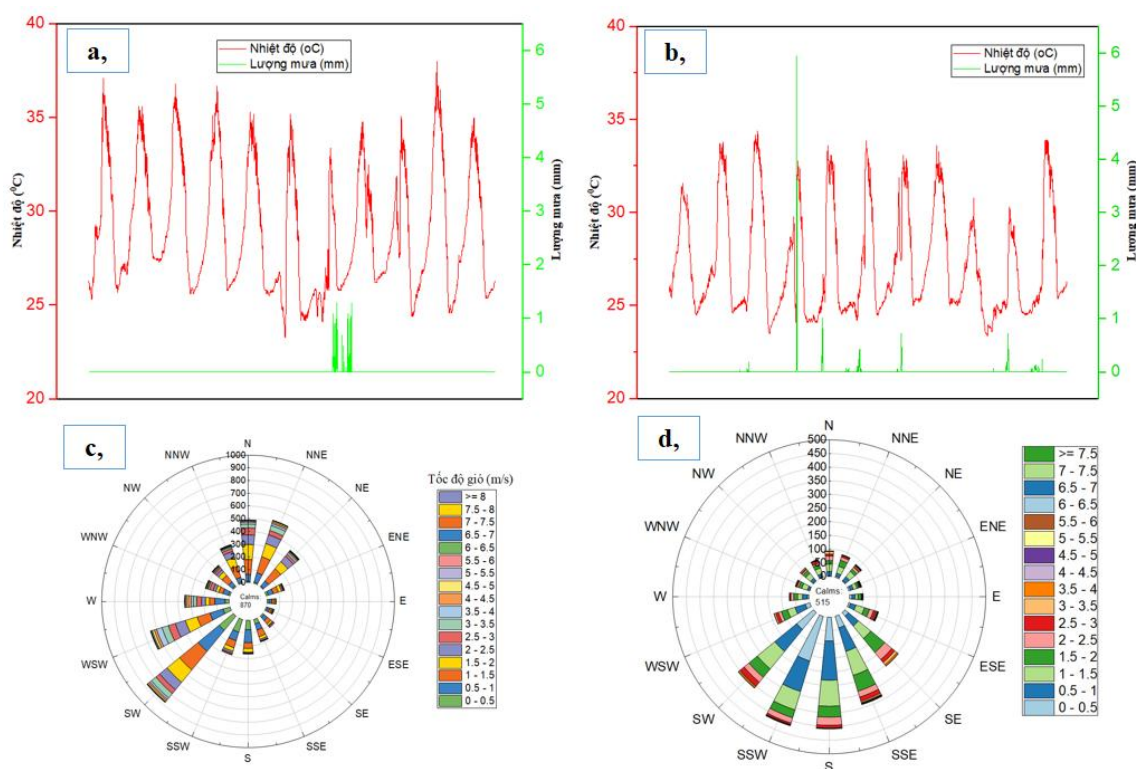


Hình 3. 5: Biểu đồ so sánh nồng độ bụi ở một số thành phố trong thời gian bị ảnh hưởng bởi Covid - 19

Đáng lưu ý, nồng độ bụi $PM_{2.5}$ tại khu vực nghiên cứu trong thời gian dịch Covid-19 vừa diễn ra thấp hơn khoảng 4,5 lần so với Thành phố Hà Nội. Những yếu tố bất lợi về điều kiện khí tượng, như khả năng khuếch tán kém do giảm độ cao hòa trộn khí quyển trong mùa đông ở Hà Nội, có thể là nguyên nhân chính dẫn đến tình trạng ô nhiễm bụi $PM_{2.5}$ gia tăng. Khi không bị ảnh hưởng bởi đại dịch, nồng độ bụi tại khu vực nghiên cứu cao hơn so với các thành phố khác được đem ra so sánh, bao gồm: Milan, Jakarta, và tương đương với Bắc Kinh - Trung Quốc. Trong khi đó, nồng độ bụi vẫn cao hơn so với nhiều thành phố châu Âu như Madrid (Tây Ban Nha), Paris (Pháp), Stockholm (Thụy Điển) và một số thành phố ở châu Mỹ như Belo Horizonte (Brazil) với nồng độ cực thấp, trung bình chỉ 5,6 $\mu g/m^3$ trong thời gian dịch chịu ảnh hưởng của dịch Covid-19 và 8,0 $\mu g/m^3$ khi không có dịch. Đặc biệt, nồng độ bụi tại thành phố Biên Hòa - Đồng Nai, khi không bị ảnh hưởng bởi đại dịch, có nồng độ gần như tương đương với một số thành phố khác trong khu vực, cho thấy tốc độ đô thị hóa và hoạt động công nghiệp tại đây đang diễn ra nhanh chóng và mạnh mẽ.

Xu hướng của nồng độ $PM_{2.5}$ vào cuối tuần thấp hơn so với ngày trong tuần ở cả hai giai đoạn lấy mẫu. Cụ thể trong giai đoạn 1, các mẫu vào ngày cuối tuần là: M2, M3, M9 và M10, và trong giai đoạn 2: K1, K2, K8 và K9. Theo kết quả thống kê,

nồng độ khối lượng (trung bình $\pm$ độ lệch chuẩn) của bụi $PM_{2.5}$ tại vị trí SB vào cuối tuần và các ngày trong tuần lần lượt là $(24,1 \pm 6,6 \mu g/m^3)$ và $(26,5 \pm 14,5 \mu g/m^3)$ trong mùa mưa, $(50,3 \pm 10,4 \mu g/m^3)$ và $(74,2 \pm 13,9 \mu g/m^3)$ trong mùa khô. Ở đây, các sự khác biệt trong giá trị trung bình $PM_{2.5}$ vào ngày thường và cuối tuần ở mùa mưa là $2,4 \mu g/m^3$ và mùa khô là $23,9 \mu g/m^3$. Kết quả tương tự cũng được tìm thấy tại vị trí LB vào các ngày cuối tuần và trong tuần lần lượt là $27,0 \pm 4,1 \mu g/m^3$ và $50,1 \mu g/m^3 \pm 27,1 \mu g/m^3$ trong mùa mưa; tương tự đối với mùa khô lần lượt là $51,86 \pm 9,16 \mu g/m^3$ và $89,01 \pm 14,79 \mu g/m^3$. Kết quả trên cho thấy mức độ đóng góp của các hoạt động của con người đến nồng độ $PM_{2.5}$ trong không khí.



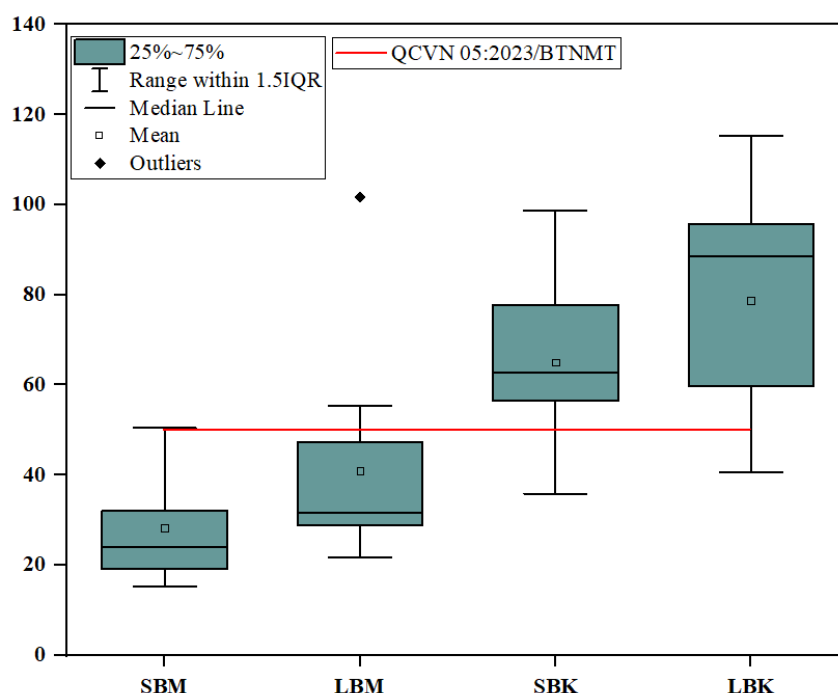
Hình 3. 6: Nhiệt độ, lượng mưa và hướng gió trong thời gian lấy mẫu
(a,c là yếu tố khí tượng vào mùa mưa; b,d là yếu tố khí tượng vào mùa khô)

Ngoài các tác động không hề nhỏ của các hoạt động dân sinh trên địa bàn nghiên cứu đến chất lượng môi trường không khí thì các đặc điểm thời tiết cũng góp phần đến nồng độ bụi $PM_{2.5}$ vào các thời điểm lấy mẫu. Nhật ký lấy mẫu và số liệu từ trạm khí tượng trong sân bay Biên Hòa ghi nhận trong thời gian lấy mẫu (Hình 3.6). Trong

giai đoạn 1, nhiệt độ giao động trong khoảng từ 23,4°C - 34,4°C, thông thường ban ngày nắng ráo nhưng chiều tối có mưa nhỏ, hướng gió chủ đạo là Bắc-Đông Bắc và Tây-Tây Nam. Trong giai đoạn 2, nhiệt độ có thể đạt đến 38°C, và hướng gió chính là hướng Bắc-Đông Bắc, Bắc - Tây Bắc. Do đó, CLKK bị ảnh hưởng bởi nhiều nguồn phát thải cục bộ từ các KCN ở Biên Hòa và Tỉnh Đồng Nai, chẳng hạn như KCN AMATA, KCN AGTEX Long Bình, KCN Biên Hòa I, KCN Biên Hòa II, KCN Tam Phước. Đây là những KCN lớn và có thể phát thải PM_{2.5} vào khí quyển. Hướng gió Tây-Tây Nam cũng có thể vận chuyển bụi từ nguồn phát thải của các tỉnh lân cận là nằm trong khu vực Đồng bằng sông Cửu Long (ĐBSCL). Nguồn phát thải bụi từ khu vực ĐBSCL có thể kể đến sự tập trung mật độ cao của các KCN và hoạt động vận tải, chẳng hạn như TP.HCM và Bình Dương đã được báo cáo bởi Thảo và Hùng (2016) [189]. Năm 2021, TP.HCM có 19 khu chế xuất và công nghiệp, 30 cụm công nghiệp, 3 nhà máy nhiệt điện, nhiều nhà máy khác, khối lượng lớn đun nấu trong gia đình sử dụng nhiên liệu thay thế (than và sinh khối) và mật độ phương tiện giao thông cao [52]. Phát thải từ đường thủy nội địa hoạt động vận tải trên sông Mekong và các cảng nội địa khu vực ĐBSCL được coi là nguồn phát thải quan trọng PM_{2.5} ảnh hưởng đến CLKK của các khu vực xung quanh.

Tiểu kết:

Hình 3.7 cho thấy hầu hết các giá trị nồng độ PM_{2.5} nằm trong khoảng từ giá trị nhỏ nhất đến lớn nhất, với chỉ một mẫu tại vị trí LBM xuất hiện ngoại biên đột biến, đạt mức 101,59 µg/m³. Trong mùa mưa, giá trị trung bình của tất cả các vị trí đều thấp hơn ngưỡng giới hạn của QCVN 05:2023/BTNMT (50 µg/m³), cho thấy chất lượng không khí tương đối ổn định. Tuy nhiên, tình hình hoàn toàn trái ngược vào mùa khô, khi hơn 50% các mẫu đo được tại cả hai khu vực đều vượt quá giới hạn QCVN trong 24 giờ. Điều này phản ánh rõ sự ảnh hưởng mạnh mẽ của điều kiện thời tiết mùa khô, làm gia tăng tích lũy bụi mịn trong không khí, đẩy mức ô nhiễm lên đáng kể.



Hình 3. 7: Các giá trị nồng độ của mùa mưa và mùa khô (Đơn vị: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Biểu đồ thể hiện giá trị nhỏ nhất (Min), bách phân vị thứ Q1 (25%), trung vị, bách phân vị Q3 (75%), giá trị lớn nhất (Max), trong đó $\text{Min} = Q1 - 1,5\text{IQR}$, $\text{Max} = Q3 + 1,5\text{IQR}$ với IQR bằng độ dài từ Q1 - Q3, chấm màu đen thể hiện giá trị ngoại biên.

3.1.3. Yêu cầu dữ liệu đầu vào của mô hình PMF

Mô hình PMF là một dạng mô hình đa biến nên số mẫu phân tích tối thiểu cần để sử dụng cho mô hình đa biến được Henry và cộng sự (1984) cần tuân thủ công thức 3.1:

$$m \geq 30 + \frac{j+3}{2} \quad (3.1)$$

Trong đó: j là số lượng chỉ tiêu cần phân tích trong m mẫu

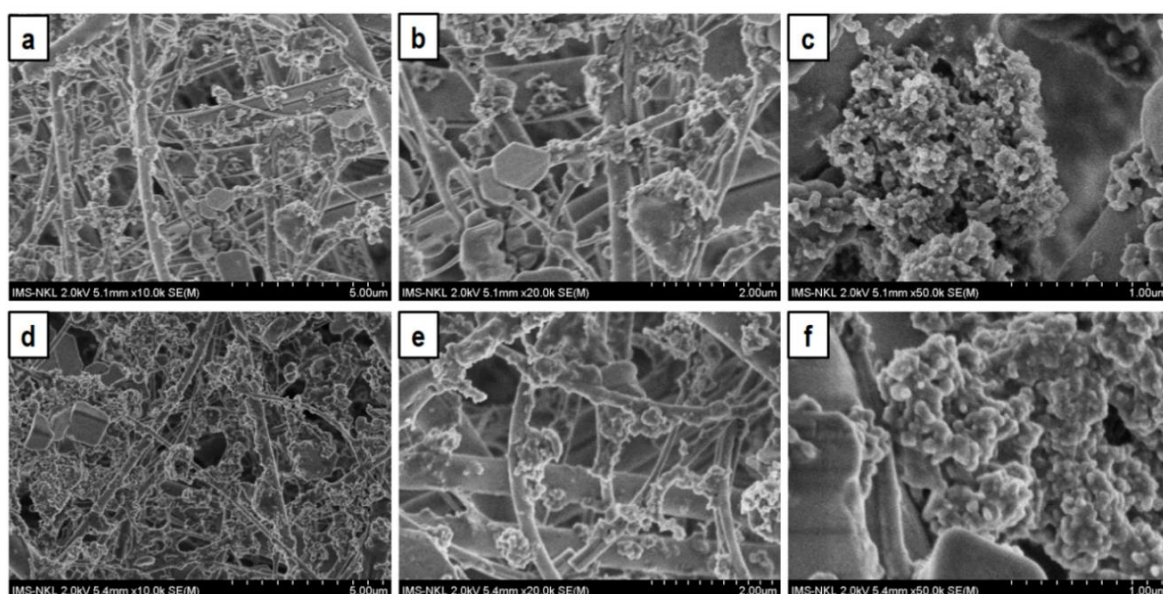
Trong nghiên cứu này, chúng tôi đã phân tích 11 kim loại và 8 ion có trong các mẫu bụi $\text{PM}_{2.5}$, tổng cộng có 19 chỉ tiêu được xem xét. Khi áp dụng công thức tính toán với 19 chỉ tiêu, kết quả cho thấy cần tối thiểu 41 mẫu. Tuy nhiên, trong thực tế, chúng tôi đã thu thập tổng cộng 42 mẫu, không bao gồm các mẫu trắng. Do đó, việc

sử dụng mô hình đa biến, đặc biệt là mô hình PMF trong nghiên cứu này, hoàn toàn phù hợp và đáp ứng được các yêu cầu đặt ra.

3.2. Các đặc điểm hóa – lý của bụi $PM_{2.5}$ tại thành phố Biên Hòa, tỉnh Đồng Nai

3.2.1. Phân cấp kích thước hạt trong mẫu bụi $PM_{2.5}$

Hình 3. 8 là các ảnh chụp đặc trưng về hình thái bề mặt của mẫu bụi $PM_{2.5}$ thu nhận được tại sân bay Biên Hòa, thành phố Biên Hòa, tỉnh Đồng Nai. Các hạt bụi có mật độ tập trung cao, phân bố khá đồng đều trên bề mặt giấy lọc và nằm xen kẽ các cấu trúc sợi của giấy lọc thạch anh (Hình a, b, d, e). Cấu trúc bề mặt khi chụp mẫu ở độ phóng đại cao hơn (Hình c, f) cho thấy các hạt thu được trên bộ lọc sợi thạch anh chủ yếu có dạng hình cầu, dạng chuỗi, dạng cụm và không đều, các hạt này có kích thước khác nhau (không lớn hơn $2,5\ \mu m$) có thể dự đoán được số hạt bụi có kích thước nhỏ dạng siêu mịn (*ultrafine particles*) chiếm ưu thế, tỷ lệ hạt mịn là rất cao.

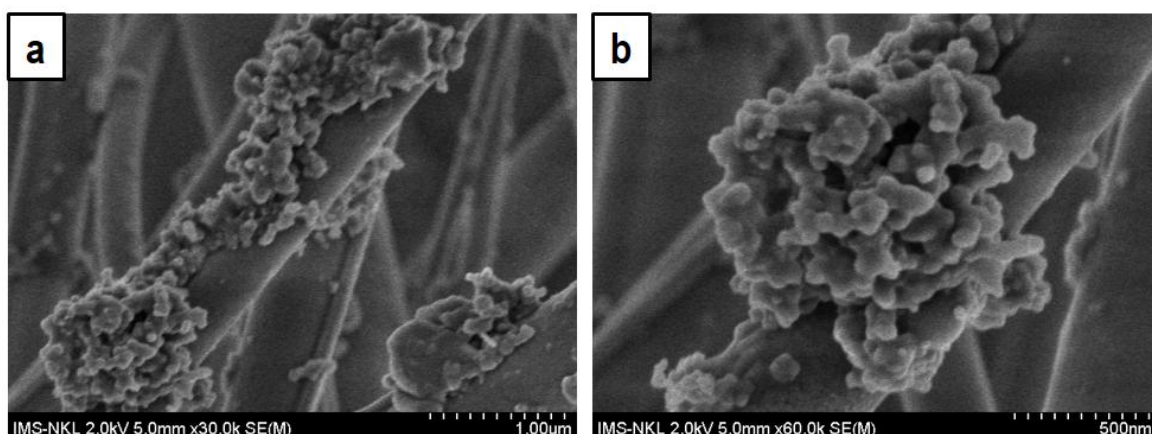


Hình 3.8: Hình ảnh chụp dưới kính hiển vi điện tử SEM

- Kết cấu hạt dạng bồ hóng

Các hạt có kết cấu dạng bồ hóng thường có hai dạng vật chất: Các chuỗi riêng lẻ như Hình 3.9b và các tập hợp như Hình 3.9a. Một số nghiên cứu chuyên sâu cho thấy, các hạt bồ hóng chủ yếu được cấu thành từ Cacbon, đi kèm với một lượng nhỏ Si, S và K. Các hạt bồ hóng được tạo ra bởi quá trình đốt cháy nhiên liệu ở nhiệt độ cao hơn $600^{\circ}C$ [57]. Quá trình đốt than và ô nhiễm khí thải xe cộ cũng là các nguồn chính

tạo ra các kết cấu dạng bồ hóng [57, 120]. Các tập hợp bồ hóng được tạo ra bởi quá trình đốt than tương tự như các tập hợp bồ hóng được tạo ra bởi khí thải xe cộ và có dạng chuỗi [117]. Các tập hợp bồ hóng thu được nghiên cứu này qua hình ảnh mô tả hình thái của khu vực nghiên cứu cho thấy các hạt đều có hình thái nhỏ tuy nhiên chúng liên kết chặt chẽ với nhau thành một khối. Thêm vào đó tại khu vực nghiên cứu chủ yếu là nơi tập hợp nhiều KCN và có mật độ dân số cao do đó mật độ di chuyển và phát thải các hạt bụi từ các động cơ xăng, oto là rất đáng lo ngại. Đường kính trung bình đối với sự phân bố kích thước, số lượng của các hạt phát thải ra từ các động cơ này có kích thước vô cùng nhỏ từ 40 - 80 nm tương đồng với kích thước được phát hiện như trong hình 3.10 [145]. Do đó khí thải của hoạt động sản xuất công nghiệp, đốt than và xe cộ là những nguồn đã ảnh hưởng đến CLKK trong quá trình lấy mẫu.

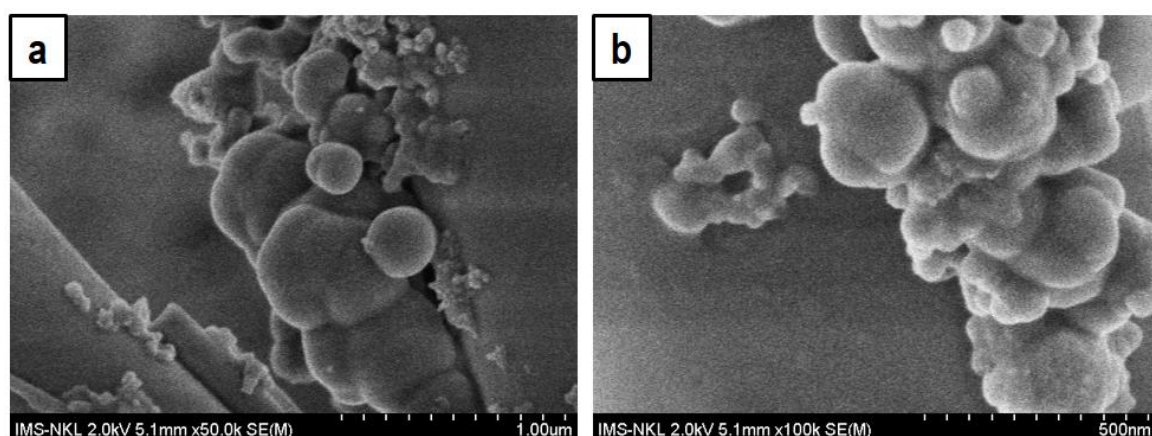


Hình 3. 9: Kết cấu dạng bồ hóng

- Kết cấu hạt dạng hình cầu

Các hạt hình cầu và hình elip được quan sát trong ảnh SEM chủ yếu được hình thành bởi tro bay và các hạt thứ cấp (Hình 3.10). Trong đó theo nghiên cứu của Xie và các cộng sự (2005) cho thấy các hạt tro bay sẽ bị biến dạng tạo thành hình elip, hình quả đào hoặc các khuyết tật trên bề mặt. Tro bay thường có dạng các hạt hình cầu và chủ yếu phát sinh từ khí thải của quá trình đốt than cũng như đốt sinh khối thực vật [146] điều này trùng hợp với các KCN xung quanh khu vực nghiên cứu. Các hạt hình cầu chủ yếu cũng là sản phẩm đốt cháy ở nhiệt độ cao và thành phần của

chúng thường bao gồm Si và Al kết hợp với một lượng nhất định bao gồm Ti, Fe, K và Ca. Thông thường, các hạt hình cầu có nguồn gốc từ sự tan chảy của chất lỏng do quá trình đốt cháy ở nhiệt độ cao [146]. Bên cạnh đó các loại hình elip được hình thành bởi các hạt thứ cấp được hình thành bởi các phản ứng hóa học trong khí quyển. Điều này tiếp tục cho thấy các hoạt động công nghiệp và các hạt được tạo ra bởi các phản ứng thứ cấp được phổ biến ở thành phố Biên Hòa – Tỉnh Đồng Nai trong thời gian tiến hành nghiên cứu.

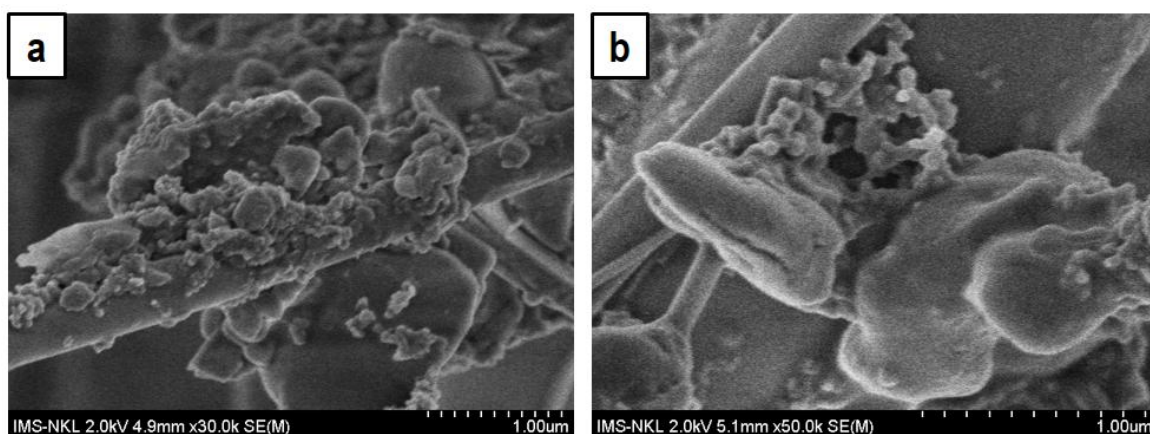


Hình 3. 10: Kết cấu dạng hình cầu

- Kết cấu hạt dạng khoáng

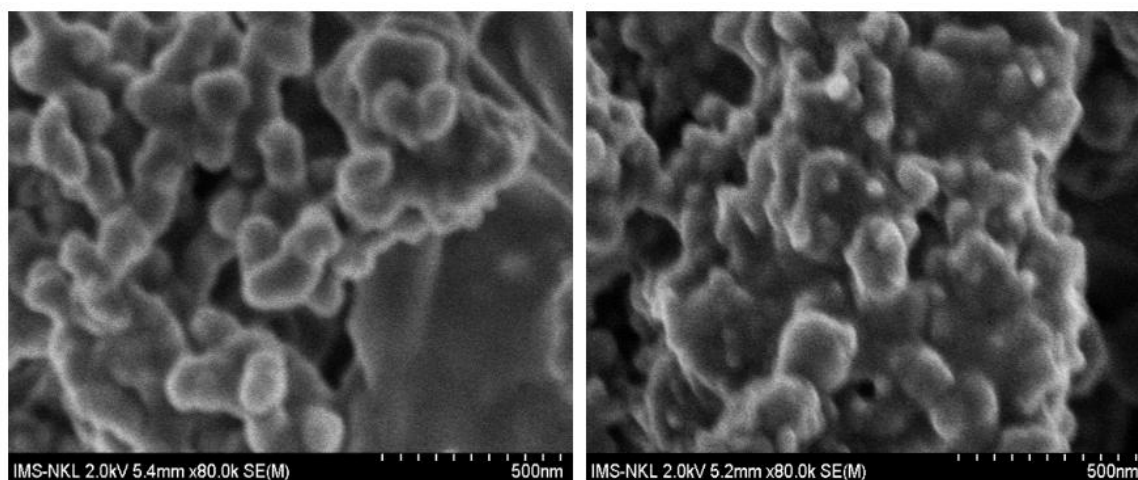
Các hạt vật chất khoáng nhưng trong Hình 3.11 là một trong những loại hạt chính quan sát được trong không khí tại khu vực nghiên cứu. Các hạt khoáng thì có hình dạng không đều, và rất đa dạng hình thù. Trong các nghiên cứu chỉ ra các hạt khoáng chất không đều này chúng chứa các nguyên tố chính Fe, Al, Mg đôi khi là Zn và các thành phần này cho thấy chúng chủ yếu là aluminosilicates là các hạt có chứa các liên kết anion Si-O-Al và thường liên kết với các cation liên kết là natri (Na^+), kali (K^+) [117]. Những vật liệu như vậy xuất hiện dưới dạng khoáng chất và vật liệu tổng hợp, thường ở dạng Zeolit aluminosilicate tổng hợp và tự nhiên đều có ý nghĩa kỹ thuật như vật liệu cấu trúc, chất xúc tác và thuốc thử. Các khoáng chất có hình dạng thông thường có dạng thanh và bao gồm các tinh thể kéo dài chỉ ra các thành phần nguyên tố chính là S và Ca điều này chứng tỏ rằng các tinh thể này chủ yếu là sunfat (thạch cao và anhydrit) [117, 120]. Thật vậy, trong nghiên cứu của Huy và cộng sự

năm 2022 tại Thành phố Hồ Chí Minh chỉ ra SO_4^{2-} là chất chiếm ưu thế nhất chiếm khoảng 50% tổng hàm lượng ion, tiếp theo là NO_3^- , K^+ , và NH_4^+ [62]. Các hạt kéo dài và các hạt hình thanh có thể được hình thành bởi các phản ứng trong môi trường không khí hay còn gọi là bụi thứ cấp. Khu vực nghiên cứu tiếp giáp với các thành phố lớn với mật độ dân số khá cao và gần với sông Mekong và biển Đông nơi các hạt khoáng chất có thể dễ dàng lơ lửng và được gió đưa đến.



Hình 3. 11: Kết cấu dạng khoáng

- Kết cấu dạng siêu mịn khác



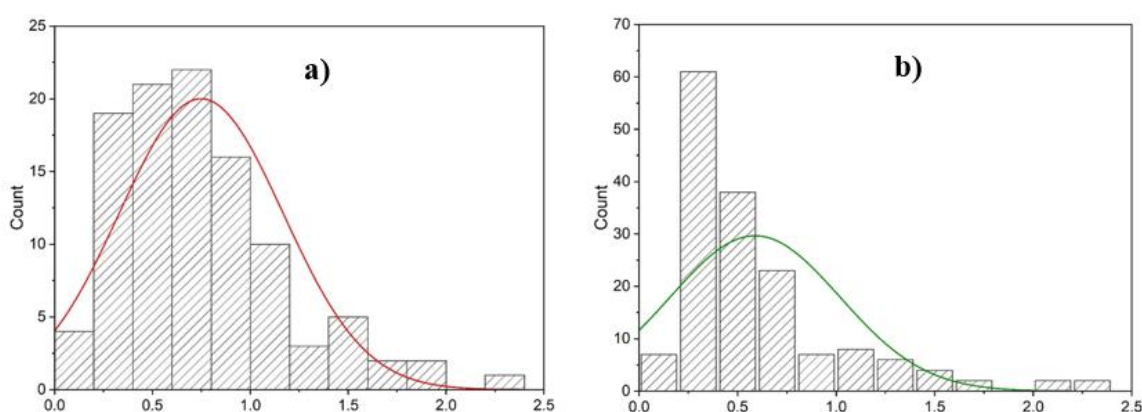
Hình 3. 12: Các kết cấu dạng siêu mịn khác

Các kết cấu hạt siêu mịn khác chưa biết ở khu vực thành phố Biên Hòa, tỉnh Đồng Nai có một số kết cấu đặc biệt đã được tìm thấy (Hình 3.12) Kích thước các hạt này nhỏ đến mức đặc điểm, hình thái rất khó xác định ngay cả dưới ảnh SEM có độ phân giải cao. Do đó, các hạt này được phân loại thành các hạt khác có thể đến từ quá trình

đốt cháy (ví dụ: khí thải xe cộ, khí đốt tự nhiên, than hoặc dầu hóa học) hoặc các hạt thứ cấp (như ngưng tụ có tính axit, sunfat và nitrat) được tạo ra bởi các phản ứng hóa học khác nhau trong khí quyển [117, 120].

Tiểu kết:

Hình 3.13 biểu diễn phân bố kích thước hạt trong các mẫu bụi $PM_{2.5}$ thu nhận được sau khi chụp ảnh SEM và xử lý bằng phần mềm ImageJ. Kết quả cho thấy mẫu bụi $PM_{2.5}$ thu được kích thước hạt có đường kính khí động học trong khoảng 2,0 - 2,5 μm chiếm tỷ lệ rất ít. Thậm chí với kích thước hạt 1,0 - 2,0 μm cũng chiếm tỷ lệ không cao. Kích thước hạt chủ yếu là những hạt bụi mịn có đường kính khí động học $\leq 1,0 \mu m$. Điều này hoàn toàn phù hợp với kết quả chụp hình thái bề mặt của mẫu vật bụi $PM_{2.5}$ đã đề cập ở trên. Bước đầu có thể nhận định rằng hàm lượng bụi $PM_{2.5}$ ở khu vực này có đóng góp chủ yếu từ nguồn phát tán từ xa, bên ngoài địa bàn nghiên cứu. Những hạt bụi mịn như vậy có khả năng phát tán rất xa nguồn phát thải và di chuyển đến khu vực nghiên cứu [50]. Tuy nhiên để có bằng chứng khoa học một cách rõ ràng hơn, xác thực hơn thì chúng ta vẫn cần các nghiên cứu bổ sung như phân tích nguồn đóng góp (bằng cách phân tích hàm lượng nguyên tố, ion trên mẫu bụi) và sử dụng các phần mềm truy tìm quỹ đạo di chuyển các chất ÔNKK dưới dạng mô hình nơi tiếp nhận.



Hình 3. 13 Tỷ lệ phần trăm kích thước các hạt bụi
Trong đó: mùa mưa (a) và mùa khô (b).

3.2.2. Đặc tính hóa học của bụi $PM_{2.5}$

3.2.2.1. Thành phần kim loại trong bụi $PM_{2.5}$

Kết quả phân tích cho thấy nồng độ kim loại nặng trong bụi $PM_{2.5}$ có tổng nồng độ dao động trong khoảng từ 1,26 đến 2,64 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ và chiếm tỷ lệ phần trăm tương đối nhỏ so với tổng khối lượng các mẫu bụi đã thu thập. Tuy nhiên, mặc dù chỉ chiếm một phần nhỏ, các nguyên tố kim loại nặng này lại đóng vai trò quan trọng và không thể xem nhẹ trong việc ảnh hưởng đến chất lượng môi trường không khí cũng như sức khỏe con người. Điều này được lý giải bởi đặc tính hóa học bền vững của kim loại nặng do chúng ít bị phân hủy hoặc chuyển hóa bởi các quá trình vật lý, hóa học và sinh học thông thường trong môi trường. Do đó, chúng có thể tồn tại trong khí quyển trong thời gian dài và dễ dàng lắng đọng hoặc lan truyền theo dòng không khí. Chính tính ổn định này giúp kim loại nặng trở thành các chỉ thị hiệu quả để truy vết và phân biệt nguồn phát thải ÔNKK theo từng khu vực cụ thể. Nhiều nghiên cứu trên thế giới đã sử dụng sự hiện diện của các nguyên tố kim loại trong bụi mịn để xác định nguồn gốc phát thải, phục vụ cho việc xây dựng chiến lược kiểm soát ô nhiễm hiệu quả hơn. Ví dụ, các nguyên tố như As, Cu, Fe, Mn, và Pb thường là đại diện của ngành công nghiệp gang thép và luyện kim; Cr có liên quan đến quá trình đốt than; Ni phản ánh hoạt động đốt dầu; trong khi đó Cd, Pb và Zn thường phát sinh từ lò đốt rác thải, còn Cu cũng thường liên quan đến hoạt động giao thông vận tải [46]. Bên cạnh nguồn gốc phát thải, một vấn đề đáng quan tâm khác là đặc tính vật lý của bụi $PM_{2.5}$. Trong nghiên cứu này, phần lớn các hạt bụi $PM_{2.5}$ đều thuộc nhóm bụi mịn với đường kính khí động học nhỏ hơn hoặc bằng 1,0 μm . Với kích thước siêu nhỏ này, chúng có khả năng xâm nhập sâu vào hệ hô hấp, thậm chí đi vào máu và tích tụ trong các cơ quan nội tạng. Do diện tích bề mặt riêng lớn, các hạt này còn dễ hấp phụ các chất ô nhiễm khác, đặc biệt là các kim loại nặng vốn đã được cảnh báo là rất độc hại đối với sức khỏe con người. Theo phân loại của Tổ chức Nghiên cứu Ung thư Quốc tế (IARC), nhiều kim loại nặng được phát hiện trong nghiên cứu như Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Cd, Hg, Pb và V đều có khả năng gây ảnh hưởng nghiêm trọng đến sức khỏe. Cụ thể, Pb và As được xếp vào nhóm 2A (có khả năng gây ung thư cho người), Zn

và Ni thuộc nhóm 2B (có thể gây ung thư), còn Cr và Cd là các chất gây ung thư đã được xác nhận, nằm trong nhóm 1 [25]. Từ những lý do nêu trên, việc lựa chọn và phân tích 11 nguyên tố kim loại nặng đặc trưng trong bụi $PM_{2.5}$ tại hai địa điểm tiêu biểu của thành phố là hoàn toàn cần thiết và có cơ sở khoa học. Điều này không chỉ giúp làm rõ các nguồn phát sinh ô nhiễm mà còn cung cấp dữ liệu quan trọng để đánh giá mức độ rủi ro mà người dân sống tại khu vực nghiên cứu có thể đang phải đối mặt.

Nồng độ trung bình theo mùa và theo vị trí của các kim loại nặng được thống kê ở Bảng 3.4 và Bảng 3.5.

Bảng 3. 4: Nồng độ của các kim loại trong bụi $PM_{2.5}$ ở vị trí SB

Đơn vị: $\mu g/m^3$

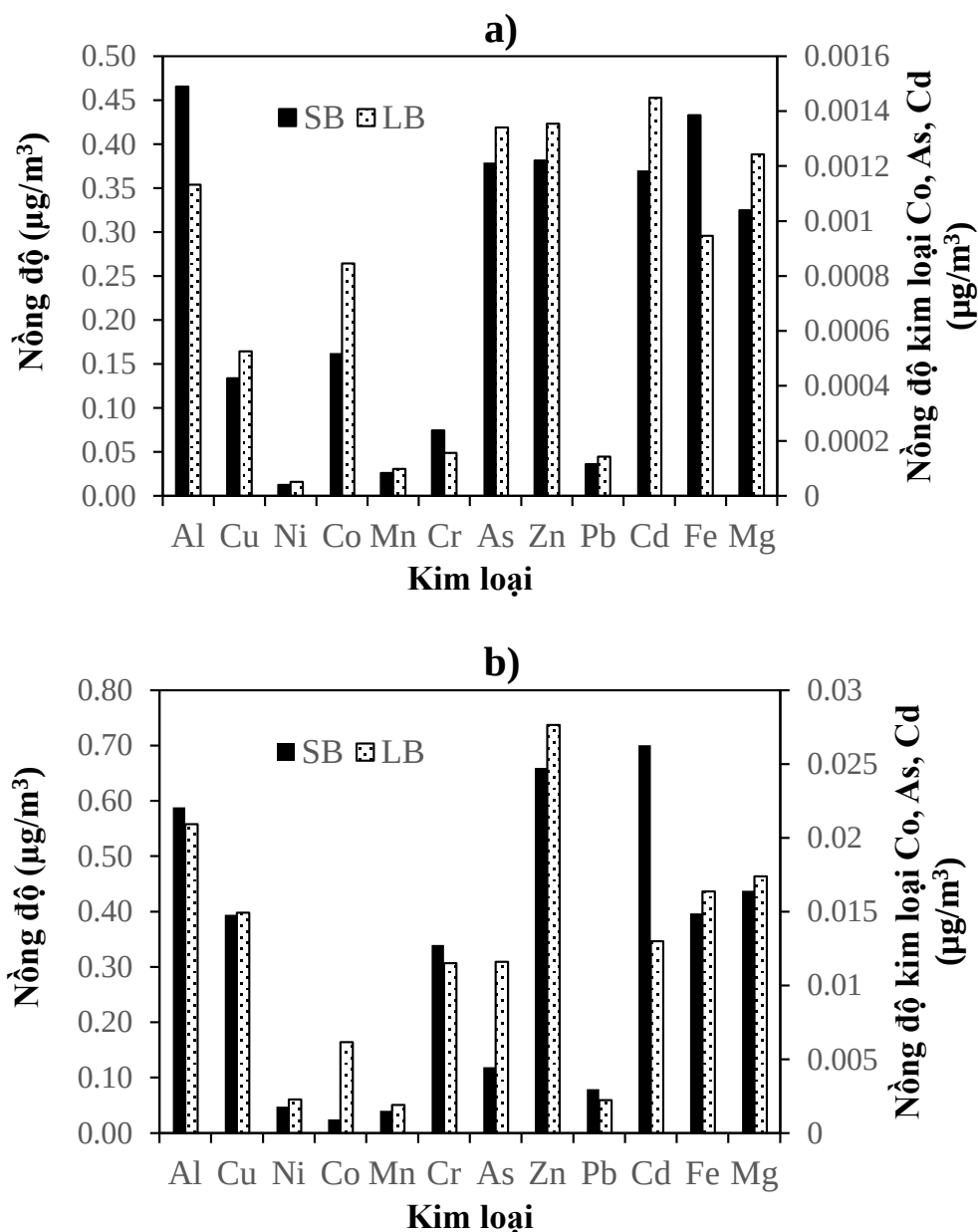
	Đợt 1		Đợt 2		P- value
	Khoảng giao động	Trung bình $\pm$ SD	Khoảng giao động	Trung bình $\pm$ SD	
Al	0,192 - 0,830	0,453 $\pm$ 0,222	0,41 - 0,82	0,59 $\pm$ 0,14	0,11
Cu	0,017 - 0,229	0,110 $\pm$ 0,070	0,12 - 0,55	0,38 $\pm$ 0,17	0,001
Ni	0,001 - 0,046	0,011 $\pm$ 0,013	0,01 - 0,32	0,055 $\pm$ 0,092	0,16
Co	0,0001 - 0,0008	0,0003 $\pm$ 0,0002	0,0001 - 0,003	0,001 $\pm$ 0,001	0,21
Mn	0,008 - 0,032	0,025 $\pm$ 0,07	0,022 - 0,063	0,037 $\pm$ 0,013	0,02
Cr	0,027 - 0,125	0,069 $\pm$ 0,033	0,165 - 0,602	0,328 $\pm$ 0,137	0,001
As	0,0003 - 0,0015	0,001 $\pm$ 0,0003	0,0002 - 0,0082	0,004 $\pm$ 0,003	0,001
Zn	0,060 - 0,641	0,395 $\pm$ 0,209	0,497 - 0,791	0,657 $\pm$ 0,094	0,001
Pb	0,004 - 0,060	0,038 $\pm$ 0,018	0,007 - 0,177	0,078 $\pm$ 0,047	0,03
Cd	0,0003 - 0,0015	0,0009 $\pm$ 0,0004	0,001 - 0,302	0,035 $\pm$ 0,094	0,28
Fe	0,249 - 0,660	0,396 $\pm$ 0,132	0,130 - 0,691	0,384 $\pm$ 0,159	0,86

Bảng 3. 5: Nồng độ của các kim loại trong bụi PM_{2.5} ở vị trí LB

Đơn vị: µg/m³

	Đợt 1		Đợt 2		P- value
	Khoảng giao động	Trung bình ± SD	Khoảng giao động	Trung bình ± SD	
Al	0,021 - 0,499	0,329 ± 0,135	0,34 - 0,79	0,58 ± 0,56	0,001
Cu	0,014 - 0,47	0,119 ± 0,141	0,078 - 0,713	0,381 ± 0,2	0,001
Ni	0,001 - 0,043	0,014 ± 0,013	0,0011 - 0,23	0,062 ± 0,067	0,05
Co	0,0001 - 0,001	0,0005±0,0003	0,0001 - 0,006	0,003 ± 0,002	0,01
Mn	0,004 – 0,04	0,028 ± 0,011	0,016 - 0,07	0,038 ± 0,015	0,10
Cr	0,001 - 0,118	0,046 ± 0,031	0,016 - 0,641	0,278 ± 0,168	0,001
As	0,0004 - 0,0014	0,0009 ± 0,0003	0,0003 - 0,032	0,012 ± 0,009	0,001
Zn	0,218 - 0,682	0,414 ± 0,162	0,305 - 1,601	0,793 ± 0,199	0,001
Pb	0,012 - 0,107	0,042 ± 0,03	0,036 - 0,076	0,056 ± 0,011	0,20
Cd	0,0003 - 0,0018	0,0011 ± 0,0005	0,001 - 0,051	0,008 ± 0,015	0,16
Fe	0,038 - 0,627	0,268 ± 0,182	0,143 - 0,729	0,429 ± 0,176	0,06

Bảng 3.4 và bảng 3.5 cung cấp nồng độ trung bình của các kim loại nặng được tìm thấy trong mỗi bộ mẫu. Sự hiện diện của các kim loại nặng trong giới hạn PM_{2.5} có thể được xếp hạng như sau: Al > Fe > Zn > Cu > Cr > Pb > Mn > Ni > As > Cd > Co đối với SBM; Zn > Al > Fe > Cu > Cr > Pb > Ni > Mn > Cd > As > Co cho SBK; Zn > Al > Fe > Cu > Cr > Pb > Mn > Ni > Cd > As > Co đối với LBM; và Zn > Al > Fe > Cu > Cr > Ni > Pb > Mn > As > Cd > Co đối với LBK. Nhìn chung, nồng độ kim loại nặng phân tích được trong các mẫu bụi PM_{2.5} vào mùa khô cao hơn vào mùa mưa tuy nhiên sự chênh lệch này không đáng kể. Mặc dù vậy, Đối với một số nguyên tố có sự đa dạng về nguồn phát sinh như Ni, Cr và Cd mức độ khác biệt có thể là đáng kể. Cụ thể là Ni và Cr trong mùa khô cao hơn trong mùa mưa với giá trị khoảng từ 4 - 6 lần tùy thuộc vào vị trí lấy mẫu. Đặc biệt, SBK và LBK có nồng độ Cd cao hơn lần lượt là 35 và 8 lần so với SBM và LBM.



Hình 3. 14: Nồng độ kim loại giữa hai vị trí SB và LB

Trong đó: mùa mưa (a) và mùa khô (b)

Hình 3.14 cho thấy tổng thể nồng độ kim loại ở khu vực công nghiệp (LB) có nồng độ cao hơn so với nồng độ kim loại tương ứng ở khu vực đô thị (SB) ở cả mùa mưa và mùa khô tuy nhiên mức độ chênh lệch không đáng kể giữa hai khu vực. Các kim loại có độc tính gây ung thư cao như As, Cd cũng có xung hướng như trên. Chỉ riêng Cr có nồng độ ở SB cao hơn, tuy nhiên không đáng kể. Theo khuyến nghị của WHO hướng dẫn về giới hạn nồng độ trung bình hàng năm đối với Pb và Cd trong

môi trường không khí lần lượt là $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ và $0,005 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [141]. Qua đó cho thấy nồng độ trung bình vào mùa mưa thì đều dưới mức khuyến nghị của tổ chức duy chỉ có nồng độ Cd vào mùa khô cao gấp 20 lần so với mức khuyến nghị.

Sử dụng kiểm tra t của Welch, giá trị p thấp ($< 0,05$) thu được đối với phần lớn các kim loại nặng được phân tích (Bảng 3.4 và bảng 3.5). Điều này chỉ ra rằng, các kim loại có ý nghĩa thống kê về sự thay đổi nồng độ trung bình giữa các mùa nghĩa là những điều kiện thời tiết thay đổi theo mùa có ảnh hưởng đến nồng độ kim loại nặng trong $\text{PM}_{2.5}$. Lý do cho sự thay đổi nồng độ theo mùa như vậy chủ yếu có thể là do sự thay đổi về khí tượng học, các nguồn được phát thải bởi sự tác động của dịch bệnh gây ra. Ngoài ra, gió cũng có thể làm gia tăng hàm lượng kim loại nặng trong bụi $\text{PM}_{2.5}$ bằng cách mang khối không khí ô nhiễm từ các vùng lân cận đến khu vực. Hướng gió (Hình 3.5) chủ đạo trong mùa khô xuất phát từ Tây Nam Bộ và Đông Nam Bộ, có mật độ dày đặc các thành phố lớn đông dân cư, công nghiệp hóa cao. Điều này có nghĩa là trong thời gian mùa khô, nồng độ kim loại nặng có thể tăng do tăng lượng phát thải bắt nguồn từ các khu vực này di chuyển đến. Đối với mùa mưa, gió thịnh hành vẫn là Tây Nam, sau đó là hướng Bắc, chủ yếu là khu vực nông thôn và đất nông nghiệp. Độ ẩm không khí cao và lượng mưa trong mùa mưa cũng thúc đẩy quá trình lắng đọng ướt [97]. Do đó, hầu như vào mùa mưa hàm lượng các kim loại, kể cả bụi cũng giảm đáng kể. Các kim loại Al, Fe và Zn là thành phần chính của vỏ lục địa [186] cũng được tìm thấy ở các thời điểm lấy mẫu có giá trị rất phong phú trong không khí điều này tương tự với các nghiên cứu trước đó được thực hiện ở hai thành phố lớn là Hà Nội và TP.HCM [32, 167, 174, 180]. Sự hiện diện của những kim loại này cho thấy rằng bụi đất cũng là nguồn chủ yếu của bụi. Trong lĩnh vực công nghiệp các quá trình nhiệt độ cao thường xuyên diễn ra như nấu chảy kim loại và đốt cháy nhiên liệu là nguồn phát thải tạo ra các kim loại dễ bay hơi (ví dụ: Cu, Cd, Zn và Fe) trong khí quyển. Thêm vào đó, đại dịch Covid -19 vẫn ảnh hưởng ít nhiều đến các hoạt động thường ngày trên địa bàn bị xáo trộn và thay vào đó là nguồn phát thải mới do hoạt động phòng chống dịch bệnh gây ra như: xử lý rác thải y tế, đốt sinh khối và lò hỏa táng bị quá tải do nạn nhân bị thiệt mạng do Covid-19 gây ra.

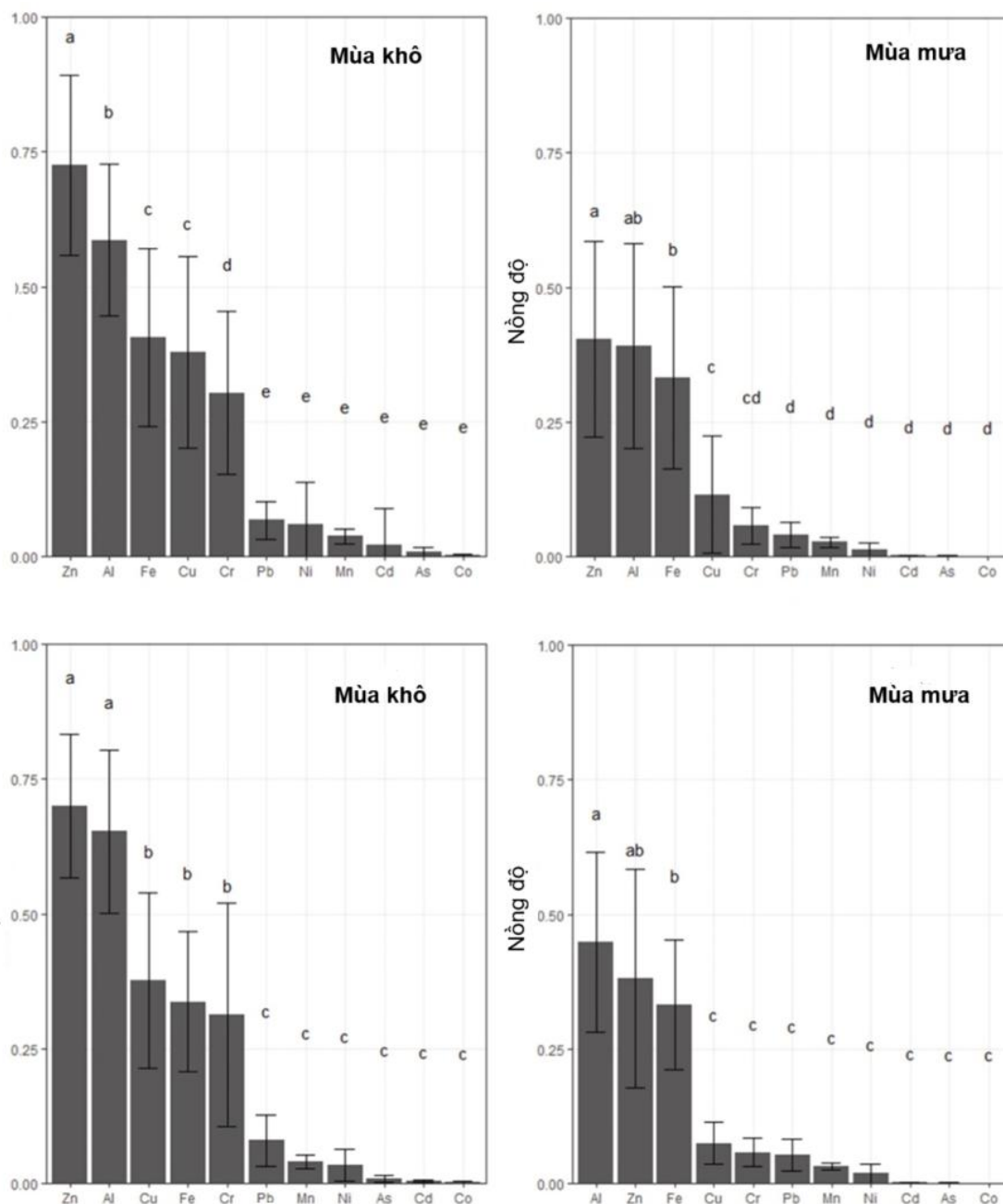
Bảng 3. 6: Mối tương quan về nồng độ các kim loại giữa hai vị trí SB và LB

	PM _{2.5}	Al	Cu	Ni	Co	Mn	Cr	As	Zn	Pb	Cd	Fe
Mưa	0,01	-0,54	0,02	-0,25	0,75	0,29	0,41	0,56	0,8	0,56	0,14	0,65
Khô	0,82	0,58	-0,11	0,89	0,19	0,48	0,33	0,12	0,37	0,36	-0,08	0,64

Vào mùa khô, nồng độ bụi giữa SB và LB có mối tương quan mạnh với nhau ($r = 0,82$). Trong khi đó vào mùa mưa không có mối liên hệ giữa SB và LB về nồng độ bụi PM_{2.5}. Ngoài ra, cũng có thể thấy rằng, một số mối tương quan trung bình được tìm thấy ở kim loại Co, Zn, Fe vào mùa mưa, và Ni, Fe, Mg vào mùa khô giữa hai vị trí. Về vị trí địa lí, hai vị trí này cách nhau không quá xa khoảng 10km. Bụi PM_{2.5} có thể phân tán trong không khí, và tồn tại trong khoảng thời gian vài ngày đến vài tuần. Vào mùa mưa, hướng gió chủ yếu là Bắc - Đông Bắc và Tây Nam, các hướng gió này hầu như không tạo bất kỳ mối liên hệ đầu cuối hướng gió giữa 2 vị trí. Tuy nhiên vào mùa khô có hướng gió Bắc - Tây Bắc, theo đó vị trí LB là vị trí đầu hướng gió và vị trí SB là cuối hướng gió. Như vậy, sẽ có thể bụi được gió mang từ vị trí LB đi qua vị trí SB.

Kết quả nghiên cứu được chia nhóm các nhóm nồng độ khác nhau để thực hiện kiểm định khoảng cách nhiều lần của Duncan (DMRT) như trong Hình 3.15 để tăng tính chính xác và khách quan. Để xác minh kết quả DMRT ban đầu, 30% phép đo nồng độ kim loại đã được tách ra và một DMRT khác được thực hiện. Sự phân biệt giữa các nhóm này được xác định bởi kết quả thu được từ thử nghiệm DMRT mà cho biết liệu nồng độ của các kim loại có khác biệt đáng kể hay không. Qua kết quả thử nghiệm kết quả ở hình 3.15 và hình 3.16 có thể chia thành 3 nhóm nguyên tố kim loại trong PM_{2.5} tại khu vực nghiên cứu như sau: những nguyên tố có nồng độ cao bao gồm Zn, Al, Cu Fe ở cả 2 mùa và Cr vào mùa khô. Tiếp theo là nhóm có nồng độ trung bình bao gồm Cu, Pb, Mn và Ni. Cuối cùng là nhóm nồng độ thấp bao gồm phần còn lại là Cd, As và Co. Đáng chú ý, Trong số nhóm có nồng độ cao xuất hiện Cr là nguyên tố thuộc nhóm 1 của tác nhân gây ung thư được xếp vào nhóm có nồng độ cao và Pb được xếp vào nhóm có thể gây ung thư (nhóm 2A) và Ni thuộc nhóm 2B

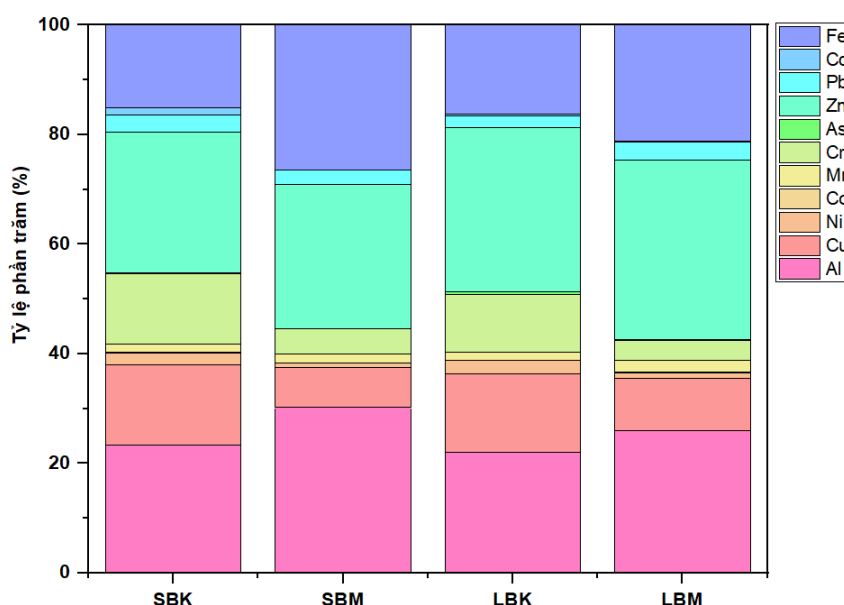
trong số các chất gây ung thư [26] được xếp vào nhóm có nồng độ trung bình. Điều này làm giáy lên mối lo ngại về chất lượng môi trường không khí ảnh hưởng đến sức khỏe con người trong khu vực nghiên cứu.



Hình 3. 15: Giá trị thử nghiệm phép chia khoảng duncan ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Trong đó: Các chữ cái a, b, c, d, e thể hiện sự khác biệt có ý nghĩa thống kê giữa các nguyên tố theo phép thử Duncan

Hình 3. 16 hiển thị thành phần hàm lượng kim loại nặng trong PM_{2.5} tại Thành phố Biên Hòa, tỉnh Đồng Nai. Có thể thấy rằng trong một mùa cụ thể, tỷ lệ phần trăm của từng yếu tố thay đổi rất ít giữa các vị trí lấy mẫu. Điều này đặc biệt đúng với các vị trí vào mùa khô do chỉ số tương quan giữa hai vị trí cao nguyên nhân đã được trình bày ở trên.



Hình 3. 16: Tỷ lệ phần trăm của các nguyên tố

Các nguyên tố chiếm phần trăm nồng độ lớn bao gồm các nguyên tố Al, Fe, Zn, Cu và Cr vào mùa khô. Nồng độ các nguyên tố trên ở tại khu vực SB đối với Al dao động từ 0,192 - 0,830 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Fe (0,130 - 0,691 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Zn (0,060 - 0,791 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Cu (0,017 - 0,55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) và Cr (0,027 - 0,602 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Tương tự đối với LB đối với Al (0,021 - 0,79 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Fe (0,038 - 0,729 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Zn (0,218 - 1,601 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Cu (0,014 - 0,713 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) và Cr (0,001 - 0,641 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Kết quả quan trắc cho thấy, nồng độ các chất trong các mẫu thu thập ở hai mùa có sự chênh lệch đáng kể. Nồng độ kim loại trong các mẫu tương ứng theo ngày tại khu vực LB thường cao hơn so với vị trí SB. Nhóm các nguyên tố nồng độ cao cho thấy 2 trong số đó nguyên tố thuộc nhóm này có nguồn gốc tự nhiên hoặc từ bụi đất, dầu đốt (Al, Fe). Nồng độ Cu được xác định thấp nhất trong 4 nguyên tố và Cu thường được tạo ra bởi quá trình làm giàu bởi các ngành công nghiệp kim loại màu. Trong nghiên cứu này, Zn có nồng độ trung bình cao nhất, đặc biệt vào mùa khô. Nguyên tố này thuộc nhóm nguyên tố có nguồn gốc

nhân tạo và được xác định chủ yếu phát sinh từ quá trình mài mòn lốp xe, khí thải động cơ diesel và các hoạt động công nghiệp [5]. Cr là nguyên tố khác biệt nhất về nồng độ theo mùa, vào mùa khô nguyên tố có nồng độ khá cao dao động 0,165 – 0,641 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, nguyên tố này tạo ra từ quá trình dầu đốt từ các hoạt động vận tải trên biển hoặc các hoạt động công nghiệp gang thép. Điều này chứng tỏ hoạt động giao thông và công nghiệp có thể đã gây ra ảnh hưởng đến CLKK tại khu vực nghiên cứu.

Nhóm các nguyên tố có tỷ lệ phần trăm nồng độ trung bình khoảng 0,001 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ - 0,107 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ vào mùa mưa và 0,007 - 0,32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ vào mùa khô bao gồm các nguyên tố Ni, Mn và Pb. Nồng độ trung bình nhóm có nồng độ thấp (nhóm 3) là sự có mặt của các nguyên tố các nguyên tố As, Co và Cd có nồng độ trung bình chiếm tỷ lệ phần trăm nhỏ cả ở mùa mưa và mùa khô. Nhóm nồng độ thấp (As, Co và Cd) là nhóm chiếm nồng độ rất nhỏ nhưng chúng lại là các nguyên tố gây hại đến sức khỏe con người lớn nhất. Đáng chú ý, Trong số nhóm có nồng độ cao xuất hiện Cr là nguyên tố thuộc nhóm 1 của tác nhân gây ung thư, Pb được xếp vào nhóm có thể gây ung thư (nhóm 2A) và Ni thuộc nhóm 2B trong số các chất gây ung thư [26] được xếp vào nhóm có nồng độ trung bình và nồng độ thấp cũng là các nguyên tố có rủi ro ung thư cao.

- *So sánh nồng độ kim loại với một số nước trên thế giới*

Nồng độ một số nguyên tố trong nghiên cứu này được so sánh với các nghiên cứu khác với một số thành phố lớn như Hà Nội (Việt Nam), Bắc Kinh (Trung Quốc), Kowloon Tong (Hồng Kông), Edinburgh (Anh), Iasi (Romania) và Seattle (USA) được trình bày trong Bảng 3.7. Cho thấy sự đa dạng về thành phần nguyên tố trong bụi $\text{PM}_{2.5}$ và nồng độ của từng nguyên tố đã được phân tích. Đặc biệt, các nguyên tố có nguồn gốc từ lớp vỏ Trái Đất như Fe, Al, Mn được ghi nhận với nồng độ cao. Điều này phù hợp với các nghiên cứu trước đây, cho thấy các kim loại này xuất hiện nhiều trong các sol khí hòa tan ở các quốc gia Đông Á. Ngược lại, nồng độ kim loại vi lượng hòa tan được báo cáo ở các thành phố châu Âu (Edinburgh và Iasi) thấp hơn đáng kể so với ở Đông Á với tỷ lệ các nguyên tố nhân tạo Zn và Pb thấp hơn (Bắc Kinh và Hồng Kông) [49].

Bảng 3. 7: So sánh nồng độ kim loại với các nghiên cứu khác (đơn vị: ng/m³)

	<i>Biên Hòa - Đồng Nai</i>	<i>Hà Nội (Mùa hè)</i>	<i>Bắc Kinh, Trung Quốc</i>	<i>Kowloon Tong, Hong Kong</i>	<i>Edinburgh, Anh</i>	<i>Iasi, Romania</i>	<i>Seattle, USA</i>
<i>Al</i>	488,9	634,5	760	400	183	72,5	15
<i>Cr</i>	18,4	45,7	-	350	5,05	2,1	0
<i>Mn</i>	32,1	25,6	-	53,5	2,25	9,9	3
<i>Fe</i>	369,3	626,1	1170	4,7	0,97	69,8	53
<i>Co</i>	1,0	0,4	-	-	-	0,07	-
<i>Ni</i>	35,5	4,9	-	-	-	20,5	2
<i>Cu</i>	246,7	80,2	140	-	-	9,7	3
<i>Zn</i>	563,2	169,8	-	-	-	29,4	9
<i>As</i>	4,5	1,8	-	-	-	6,5	1
<i>Cd</i>	11,3	4,0	-	2,7	0,25	0,29	-
<i>Pb</i>	53,3	184,8	720	-	0,24	2,29	630
<i>Tài liệu tham khảo</i>	TNCN	[23]	[23]	[65]	[47]	[44]	[23]

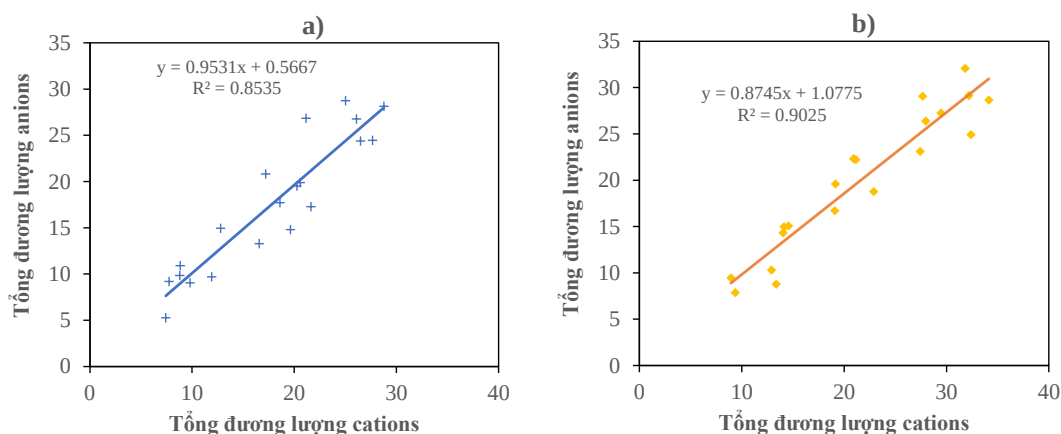
3.2.2.2. Thành phần Ions trong bụi $PM_{2.5}$

Các ions chính được phân tích bao gồm cations (NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} , Na^+ , và Mg^{2+}) và anions (Cl^- , NO_3^- , và SO_4^{2-}). Kết quả trong hai đợt nghiên cứu được trình bày trong bảng 3.8.

Bảng 3. 8: Nồng độ các ions chính trong bụi $PM_{2.5}$ tại khu vực nghiên cứu

		SB ($\mu g/m^3$)		LB ($\mu g/m^3$)	
		Mùa mưa	Mùa khô	Mùa mưa	Mùa khô
Cations	NH_4^+	$2,78 \pm 1,14$	$5,02 \pm 1,48$	$3,15 \pm 2,39$	$6,81 \pm 1,13$
	K^+	$1,26 \pm 0,86$	$1,55 \pm 1,21$	$2,00 \pm 1,38$	$1,63 \pm 1,09$
	Ca^{2+}	$2,17 \pm 1,21$	$3,36 \pm 1,07$	$3,59 \pm 1,43$	$3,66 \pm 1,49$
	Na^+	$3,38 \pm 1,66$	$8,04 \pm 2,29$	$2,98 \pm 1,65$	$9,45 \pm 1,76$
	Mg^{2+}	$0,38 \pm 0,15$	$0,93 \pm 0,43$	$0,42 \pm 0,32$	$0,99 \pm 0,54$
Tổng đương lượng cations		$12,51 \pm 5,10$	$23,18 \pm 4,09$	$16,15 \pm 6,98$	$27,2 \pm 5,21$
Anions	Cl^-	$1,88 \pm 0,81$	$3,69 \pm 1,18$	$2,22 \pm 1,46$	$3,19 \pm 0,99$
	NO_3^-	$3,04 \pm 1,21$	$6,83 \pm 1,15$	$3,9 \pm 2,21$	$6,19 \pm 1,38$
	SO_4^{2-}	$3,25 \pm 1,28$	$6,61 \pm 1,51$	$4,35 \pm 1,8$	$7,94 \pm 1,49$
Tổng đương lượng anions		$11,42 \pm 3,59$	$27,52 \pm 4,33$	$14,81 \pm 6,48$	$25,26 \pm 4,39$

Tổng đương lượng cations và anions chính có sự chênh lệch nhau giao động từ 0,26 - 4,82 μg đương lượng trong mùa mưa và từ 0,22 - 5,49 μg đương lượng trong mùa khô. Có thể giải thích điều này rằng, có thể còn một số ions khác như ion oxalate ($C_2O_4^{2-}$), bromide (Br^-), methanesulfonic acid (MSA-),... hiện diện nhưng chưa được phân tích trong nghiên cứu này. Tuy nhiên, có thể thấy rằng các ions được phân tích là các ion chính trong bụi. Các ion chính chiếm phần trăm khối lượng lớn trong bụi $PM_{2.5}$. Phần trăm khối lượng các ions này chiếm từ 41,4 %- 75,9% trong mùa mưa và 39,2% - 76,4% trong mùa khô.



Hình 3. 17: Tương quan tổng đương lượng cation và anion tại vị trí SB (a) và vị trí LB (b).

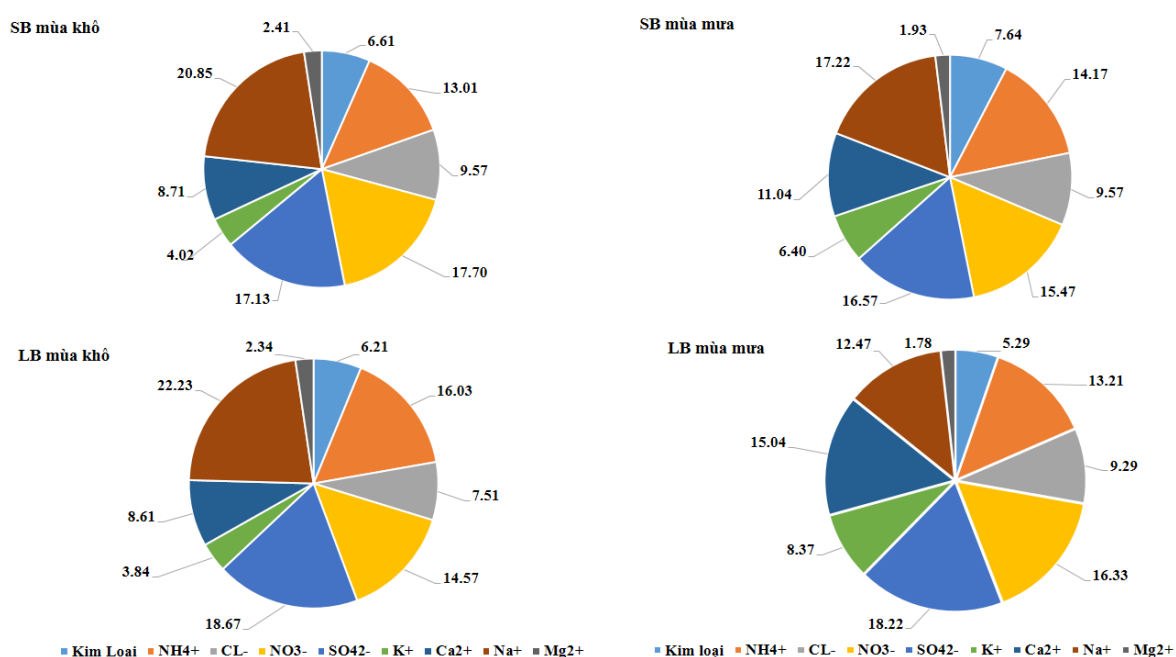
Hình 3. 17 biểu diễn mối tương quan về đương lượng giữa nồng độ các cation và anion trong bụi $PM_{2.5}$ ở 2 vị trí nghiên cứu. Kết quả cho thấy mối tương quan giữa cation và anion là rất cao ($R^2 = 0,85$ và $R^2 = 0,90$), cho thấy sự cân bằng giữa các ion được phân tích trong bụi $PM_{2.5}$.

Cũng giống như hàm lượng kim loại nặng, các ions trong bụi $PM_{2.5}$ có nồng độ cao hơn vào mùa khô ở cả 2 vị trí nghiên cứu. Sự xuất hiện nồng độ cao của ion Na^+ ở vị trí SB cho thấy có sự ảnh hưởng của muối biển. Theo Stumm và Morgan tỷ lệ mole giữa ion Na và Cl trong muối biển sẽ là khoảng 1,164 [177]. Trong nghiên cứu này, tỷ lệ Na^+/Cl^- trung bình là $3,3 \pm 1,5$ ở vị trí SB và $3,7 \pm 2,0$ ở vị trí LB. Như vậy ngoài nguồn từ muối biển, Na^+ còn có thể từ sự đóng góp của nguồn vỏ trái đất, hoặc từ nguồn nhân tạo [184]. SO_4^{2-} là anions có nồng độ cao nhất trong bụi $PM_{2.5}$. Kết quả này tương tự với nghiên cứu ở Thành phố Hồ Chí Minh [176].

Tiểu kết về đặc tính hóa học:

Trong nghiên cứu này đã phân tích được 11 kim loại và 8 ion chính. Kết quả phân tích cho thấy các kim loại có nồng độ cao chủ yếu là các kim loại đến từ vỏ trái đất. Nồng độ các kim loại và ions có sự biến động theo mùa bằng chứng cho thấy nồng độ vào mùa khô cao hơn so với mùa mưa đặc biệt nồng độ trung bình Cd vào mùa khô cao gấp 20 lần so với khuyến nghị của WHO hướng dẫn về giới hạn nồng độ trung bình hàng năm đối với Cd là $0,005 \mu g/m^3$ [141]. Tổng độ các kim loại

thu được chiếm 5,29 - 7,64% nồng độ các chất đã phân tích được trong bụi bụi và Cation chiếm tỷ lệ phần trăm lớn nhất là Na^+ chiếm 12,47 - 22,23% và anion chiếm tỷ lệ lớn nhất là SO_4^{2-} là từ 16,57 - 18,67%. Qua đó cho thấy các ion chiếm tỷ lệ phần trăm lớn trong các mẫu bụi đã thu nhận được. Bước đầu nhận định ngoài các nguồn trên đất liền còn có các nguồn từ môi trường biển đã ảnh hưởng đến khu vực. Điều này sẽ được làm rõ với các kết quả mô hình ở mục 3.3.



Hình 3. 18: Tỷ lệ phần trăm của kim loại và các ion theo từng mùa

3.3. Kết quả mô hình hóa xác định quỹ đạo di chuyển và xác định nguồn đóng góp bụi $\text{PM}_{2.5}$ đến chất lượng không khí thành phố Biên Hòa, tỉnh Đồng Nai.

3.3.1. Kết quả quỹ đạo di chuyển của bụi $\text{PM}_{2.5}$ xác định bằng mô hình HYSPLIT

Mục đích của mô hình HYSPLIT là xác định các nguồn tiềm năng được khối khí trong tháng 10/2021 vào mùa mưa và tháng 03/2022 vào mùa khô nhằm xác định khối khí có nguồn gốc địa phương hay là được vận chuyển từ xa đến và tỉ lệ đóng góp của các khối khí này đến nồng độ bụi $\text{PM}_{2.5}$ tại khu vực nghiên cứu. Trong nghiên cứu này mô hình HYSPLIT được sử dụng để khảo sát quỹ đạo ngược của sự phân tán bụi $\text{PM}_{2.5}$ qua vị trí trạm khảo sát với khoảng thời gian 96 giờ trước đó. Dữ liệu khí tượng sử dụng trong phân tích này là dữ liệu khí tượng NCEP/NCAR Reanalysis, độ

phân giải không gian là $2,5^\circ$, độ phân giải thời gian là 6 giờ trong khoảng thời gian thu thập số liệu tại địa bàn nghiên cứu. Để có thể chạy mô hình HYSPLIT, tệp dữ liệu khí tượng thông thường phải gồm 3 loại dữ liệu: Dữ liệu độ cao (upper air data), dữ liệu bề mặt (surface data) và dữ liệu không đổi với thời gian (time invariant data).

Trong đó dữ liệu độ cao phải chứa tối thiểu các biến sau:

Độ cao địa thế năng (geopotential),

Nhiệt độ (Temperature)

Thành phần vận tốc u (u-velocity)

Thành phần vận tốc v (v-velocity)

Thành phần vận tốc w (w-velocity)

Độ ẩm tương đối (relative humidity)

Các tệp dữ liệu bề mặt phải chứa các dữ liệu:

Nhiệt độ

Thành phần vận tốc u 10m (10m u-velocity)

Thành phần vận tốc v 10m (10m v-velocity)

Tổng lượng mưa (total precipitation)

Các dữ liệu bất biến với thời gian bao gồm:

Độ cao địa hình (terrain height)

Chiều cao địa hình hoặc áp suất bề mặt là bắt buộc để HYSPLIT có thể nội suy dữ liệu mức áp suất cho địa hình bên trong của nó theo hệ tọa độ.

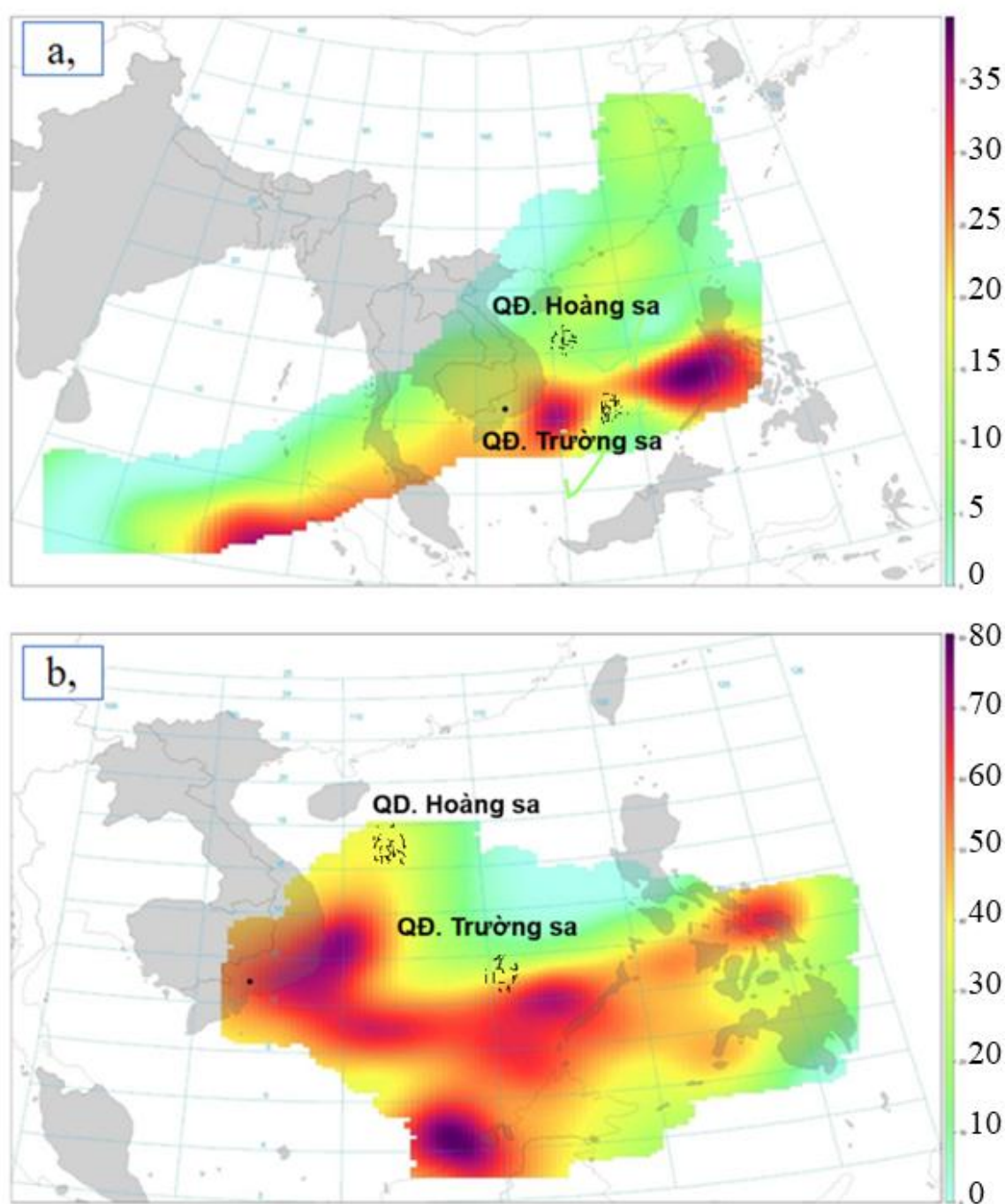
Trong nghiên cứu này, để xác định nguồn gốc của khối khí, phương pháp phân tích quỹ đạo ngược có trọng số nồng độ (Concentration Weighted Trajectory - CWT) và phân tích cụm quỹ đạo (Trajectory Clustering) được áp dụng (Phương pháp được mô tả chi tiết trong Chương 2). Kết quả của mô hình là quỹ đạo ngược 96 giờ của khối không khí tại độ cao tiếp nhận là khoảng 10m được khảo sát trong thời gian tháng 10/2021 và tháng 3/2022 được thể hiện tương ứng như hình 3.19 và bảng 3.9. Kết quả của mô hình đưa ra tương đồng với biểu đồ hoa gió được xây dựng dựa trên dữ liệu khí tượng đã thu được tại vị trí nghiên cứu.

Bảng 3. 9: Thống kê nồng độ bụi PM_{2.5} tính cho các cụm quỹ đạo

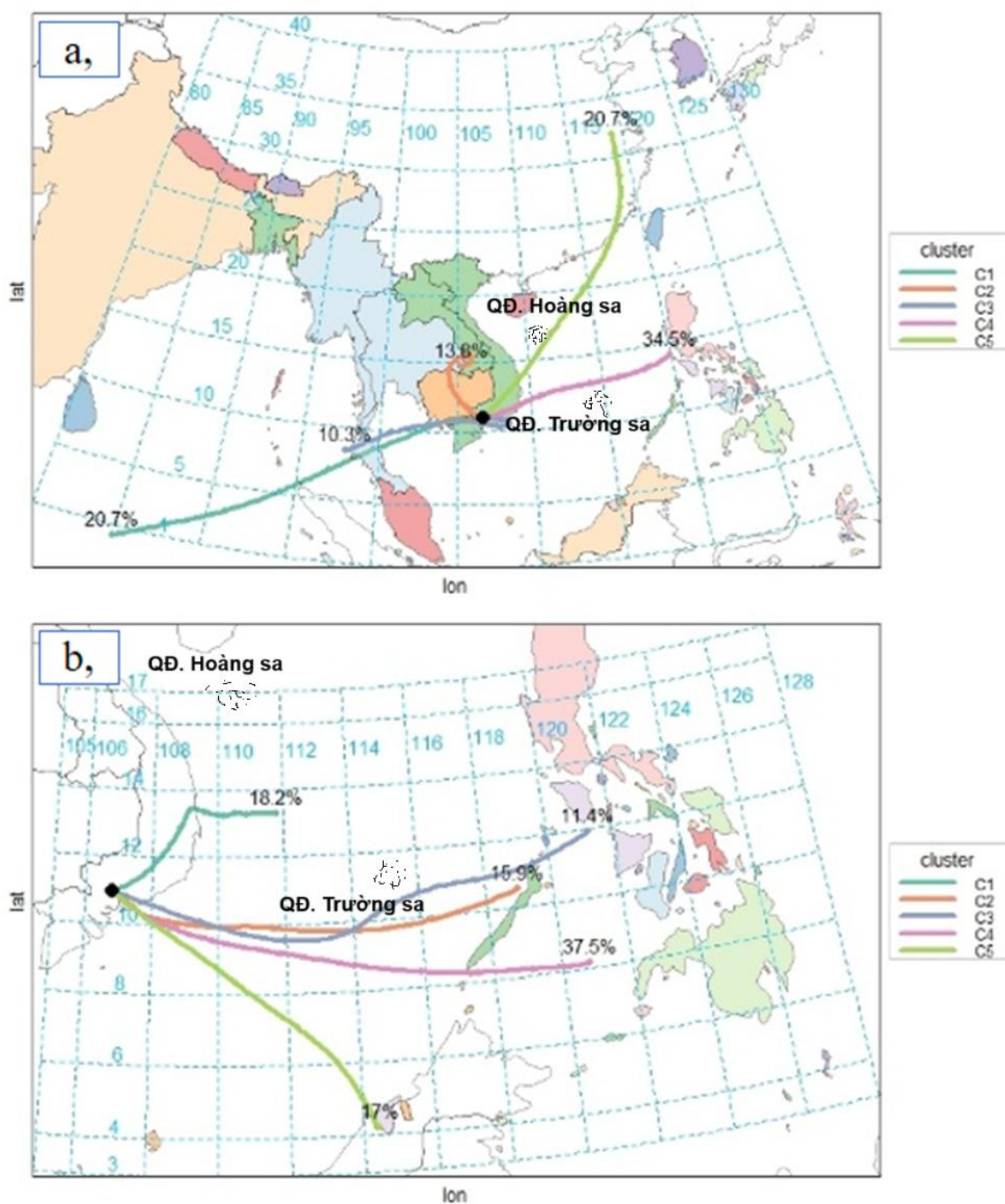
Cụm	Phần trăm đóng góp cụm (%)		Nồng độ trung bình (µg/m ³)	
	Mùa mưa	Mùa khô	Mùa mưa	Mùa khô
C1	20,7	18,2	26,73	72,75
C2	13,8	15,9	21,06	49,05
C3	10,3	11,4	24,7	98,7
C4	34,5	37,5	44,48	60,5
C5	20,7	17	25,2	77,9

Hình 3.19a là vào mùa mưa và Hình 3.19b vào mùa khô trình bày quỹ đạo ngược có trọng số nồng độ (CWT) trong các thời gian lấy mẫu, dải màu từ xanh nhạt cho đến đỏ đậm biểu thị là những khu vực có giá trị nồng độ PM_{2.5} tương ứng hay còn là những vị trí tiềm năng là các nguồn phát thải PM_{2.5} được các yếu tố khí tượng đem đến khu vực. Vùng CWT rộng phản ánh có sự vận chuyển dài hạn trong thời gian này. Mặc dù kết quả CWT có thể chỉ ra sự vận chuyển dài hạn PM_{2.5} bởi các nguồn từ hướng Đông Bắc và Tây Nam bao gồm các khu vực ven biển Việt Nam, cũng như các nước lân cận như Malaysia, Brunei, Philippines và Trung Quốc. Ngoài ra, trọng số nồng độ cũng chỉ ra rằng việc phát tán các nguồn gây ô nhiễm bụi PM_{2.5} cũng cho thấy ngoài giao thông đường bộ, công nghiệp và sản xuất thì giao thông đường thủy cũng đóng góp các chất ô nhiễm đến việc phát thải chất ô nhiễm đến khu vực nghiên cứu. Những phát hiện tương tự đã được đề xuất trong công trình của Hiền và các cộng sự (2022) trong nghiên cứu sự góp phần của các phương thức vận tải khác nhau vào CLKK kém ở TP.HCM [49]. Cuối cùng, các nhà máy điện đốt than ở khu vực Đông Nam Trung Quốc (Quý Châu, Liễu Châu và Hồ Nam) có thể là một ví dụ đáng chú ý về các nguồn ảnh hưởng đến nồng độ kim loại nặng trong PM_{2.5} trong quá trình nghiên cứu thông qua vận chuyển phát thải xuyên biên giới [33]. Điều này đặc biệt đúng trong mùa mưa, khi gió Bắc phát triển mạnh hơn. Trong nghiên cứu của Cohen và cộng sự (2010) đã kết luận rằng khí thải từ các máy phát điện này có khả năng phân tán tầm xa [33]. Tuy nhiên, do bản chất của phương pháp CWT tính toán nồng độ quỹ đạo có trọng số đi qua ô lưới nên kết quả phản ánh cả vận chuyển tầm xa và ảnh

hướng của khí tượng địa phương tại vị trí đó. Vì vậy, để toàn diện hơn nghiên cứu đã xem xét đến cả tác động của vận chuyển tầm xa đối với $PM_{2.5}$ đã sử dụng phương pháp phân tích cụm quỹ đạo là nhóm các khối khí tượng có nguồn gốc tương tự nhau lại thành một cụm như hình 3.20.



Hình 3. 19: Kết quả CWT của bụi $PM_{2.5}$ đối với mùa mưa (a) và mùa khô (b)



Hình 3. 20: Kết quả phân cụm đối với mùa mưa (a) và mùa khô (b)

3.3.1.1. Kết quả xác định quỹ đạo di chuyển của bụi PM_{2.5} bằng mô hình HYSPLIT vào mùa mưa

Từ hình 3.20a cho thấy nồng độ bụi PM_{2.5} trung bình của các cụm đều thấp hơn nồng độ trung bình của các cụm vào mùa khô, và phần trăm các cụm quỹ đạo này dao động từ 10,3% đến 34,5%. Các khối khí trên đều mang theo các chất ô nhiễm đến

khu vực nghiên cứu. Cụm có phần trăm lớn nhất là cụm C4 chiếm 34,5% và có nồng độ bụi $PM_{2.5}$ trung bình ở cụm này $44,48 \mu g/m^3$ cũng là cụm đóng góp nồng độ trung bình lượng bụi $PM_{2.5}$ là cao nhất. Cụm này theo như trên hình 3.20a cho thấy xuất phát từ nước Malaysia và Brunei đi qua Biển đông có thể đã kết hợp với các chất thải từ các hoạt động vận chuyển tàu bè trên biển đã đem đến một lượng chất ô nhiễm khá lớn đến khu vực nghiên cứu.

Hai cụm C1 và C3 chiếm phần trăm lần lượt là 20,7% và 10,3% có nồng độ trung bình $PM_{2.5}$ của cụm này là $26,73 \mu g/m^3$ và $24,7 \mu g/m^3$. Nồng độ trung bình của hai cụm này nhỏ hơn rất nhiều so với Cụm C4. Nguồn gốc của nhóm cụm thuộc phía Tây Nam bắt nguồn từ Biển đi vào đất liền qua vịnh thuộc chủ quyền của Thái Lan sau đó đem các chất ô nhiễm đi vào Việt Nam qua các tỉnh thuộc vùng ĐBSCL là nơi tập trung của hoạt động sản xuất nông nghiệp thời gian này vừa xong vụ thu hoạch lúa nên các hoạt động đốt rơm rạ cũng sẽ nguồn đóng góp lượng bụi đến khu vực nghiên cứu [3, 105] tiếp đến cụm C1 cũng được đóng góp bởi khu vực tập trung bởi các hoạt động con người cũng như là công nghiệp lớn đó là Thành phố Hồ Chí Minh.

Cụm C2 chiếm 13,6% tổng số nguồn gây ô nhiễm đến khu vực nghiên cứu, Cụm C2 có nồng độ $PM_{2.5}$ trung bình là $21,06 \mu g/m^3$, Cụm bắt nguồn hoàn toàn từ trong đất liền bắt nguồn bắt đầu từ Nam Lào và đi qua trung tâm Campuchia. Hiện nay ở vấn đề về ÔNMT không khí đặc biệt là bụi $PM_{2.5}$ vẫn còn chưa có các nghiên cứu cụ thể được công bố.

Cụm C5 chiếm phần trăm là 20,7% cụm này bắt nguồn từ quỹ đạo hướng Đông Bắc bắt nguồn rất xa so với địa bàn nghiên cứu từ lãnh thổ của thành Phố lớn Thượng Hải và Quảng Đông - Trung Quốc đóng góp nồng độ trung bình $PM_{2.5}$ là $25,2 \mu g/m^3$. Cụm C3 từ Thượng Hải đi qua Quảng Đông – Trung Quốc đến Biển Đông và đi qua Bình Thuận (*nay là tỉnh Lâm Đồng*) có nhà máy Nhiệt Điện là nguồn tiềm ẩn khả năng gây ra lượng bụi $PM_{2.5}$ đóng góp nguồn ảnh hưởng đến khu vực nghiên cứu. Cụm C5 từ biển đông khi đến lãnh thổ Việt Nam đi qua nhiều tỉnh ở Việt Nam và đáng chú ý hướng này có tỉnh Bình Dương (*nay là TP. HCM*) là nơi tập trung rất nhiều KCN nơi có thể gây ra. Bên cạnh đó, cụm C5 còn tiềm ẩn sự đóng góp các

nguồn gây ra ô nhiễm lớn như: Các trạm sản xuất xi măng lớn như Bình Phước (*Nay là tỉnh Đồng Nai*), sản xuất Thép ở Đắk Lắk

3.3.1.2. Kết quả xác định quỹ đạo di chuyển của bụi $PM_{2.5}$ bằng mô hình HYSPLIT vào mùa khô

Các cụm quỹ đạo mùa khô được thể hiện như hình 3.20b được mô hình HYSPLIT chia thành 5 cụm chính ảnh hưởng đến CLKK. Kết quả cho thấy có tới 3 cụm chất ô nhiễm xuất phát từ các quần đảo thuộc Philippines là các cụm C2, C3, C4 chiếm phần trăm lần lượt là 15,9% ; 11,4% và 37,4%, tương ứng nồng độ trung bình kèm theo các cụm đem đến $49,05 \mu\text{g}/\text{m}^3$; $98,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ và $37,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Trong đó có cụm C3 cao hơn khoảng 2 lần so ngưỡng so với QCVN 05:2023/BTNMT ($50\mu\text{g}/\text{m}^3$) [8]. Điều này phù hợp với thời gian tháng 3/2022 núi lửa Taal ở Philippines đã có đợt phun trào phreatomagmatic có thể đã giải phóng một lượng lớn bụi mịn đi qua Biển Đông và ảnh hưởng đến chất lượng không khí tại khu vực nghiên cứu, làm nồng độ $PM_{2.5}$ tăng vọt. Hiện nay, việc ảnh hưởng chất lượng môi trường không khí tại khu vực cũng là vấn đề được các nhà khoa học quan tâm. Các hạt bụi $PM_{2.5}$ có thể phát tán rất xa nguồn phát thải và đi đến khu vực nghiên cứu [33, 49]. Các cụm xuất phát từ Philippines đến Biển Đông kèm theo các chất thải từ các hoạt động hàng hải trên biển vào tỉnh Bà Rịa Vũng Tàu (*nay là Thành Phố Hồ Chí Minh*) nơi tập trung rất nhiều nguồn tiềm ẩn lượng phát thải bụi lớn như: Nhà máy sản xuất thép, xi măng và nhiệt điện và thời gian các nhà máy kể trên đã trở lại hoạt động sau thời gian chịu ảnh hưởng bởi đại dịch Covid – 19 do bị giãn cách và thiếu nhân công tại các nhà máy.

Cụm C1 chiếm 18,2% và nồng độ $PM_{2.5}$ trung bình là $72,75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ đóng góp tương đối lớn trong 5 cụm được phân tích được. Cụm C1 bắt nguồn trực tiếp trên Biển Đông sau đó đi vào đất liền theo hướng Đông - Bắc so với khu vực nghiên cứu và đi qua nhiều tỉnh trên đất liền như: Bình Định (*nay là tỉnh Gia Lai*), Đắk Lắk, Lâm Đồng và đến khu vực nghiên cứu. Điều tương tự đã được chỉ ra trong một nghiên cứu của tác giả Dương Hữu Huy và các cộng sự (2018) chỉ ra bụi $PM_{2.5}$ ở Hồ Chí Minh cũng bị ảnh hưởng bởi các hạt vật chất được đem đến từ Biển Đông theo hướng Đông -

Bắc qua có sự đóng góp của các hoạt động công nghiệp nặng vào mùa khô gây ảnh hưởng lớn đến CLKK tại khu vực [37].

Cụm C5 đóng góp 17% và nồng độ $PM_{2.5}$ trung bình là $77,9 \mu g/m^3$. Cụm này bắt nguồn từ Vương Quốc Brunei là nước có ngành công nghiệp chính là dầu mỏ và khí đốt, nghiên cứu của Effa Nabilla Aziz và cộng sự đã chỉ ra lượng bụi ở Brunei bị ảnh hưởng lớn bởi ngành công nghiệp này [17]. Cụm C5 đi qua Biển Đông tiếp tục được đóng góp bởi các nguồn gây ô nhiễm lớn ở Tỉnh Bà Rịa - Vũng Tàu (*nay là Thành Phố Hồ Chí Minh*). Sự ảnh hưởng bởi các nguồn đóng góp đến CLKK đã được chỉ ra từ các nghiên cứu tương tự trong nước và các nghiên cứu trên thế giới đều chỉ ra sự ảnh hưởng nhà máy nhiệt điện chạy than, xi măng là nguồn gây ô nhiễm chủ yếu [32, 119].

3.3.2. Kết quả định danh nguồn đóng góp vào bụi $PM_{2.5}$ tại khu vực nghiên cứu bằng mô hình PMF

3.3.2.1. Dữ liệu đầu vào cho mô hình PMF

Từ các mẫu thu được ở mùa mưa và mùa khô, Tổng số mẫu là 42 mẫu được lựa chọn sau khi được phân tích QA/QC để phục vụ cho chạy mô hình PMF. Ban đầu bộ dữ liệu đầu vào đến mô hình bao gồm: Nồng độ bụi $PM_{2.5}$, 8 ion và 11 nguyên tố đồng thời tính toán độ không đảm bảo đo của các nhân tố được đưa vào mô hình.

Mô tả thông kê của tất cả các thông số phân tích bao gồm giá trị nhỏ nhất, bách phân vị Q1 - 25%, trung vị, bách phân vị Q3 - 75%, giá trị lớn nhất cũng như phân loại của từng thông số dựa vào tỷ lệ S/N (Signal/Noise) được thể hiện trong Bảng 3.15. Thông số có $S/N \geq 2,0$ được phân loại mạnh (Strong), thông số có $0,2 \leq S/N < 2,0$ được phân loại yếu (Weak) và thông số có $S/N < 0,2$ được phân loại xấu (Bad). Thông số được phân loại xấu bị loại ra khỏi mô hình.

Từ bảng cho thấy dữ liệu đầu vào gồm 20 thông số bước đầu cho 3 thông số có $0,2 \leq S/N < 2,0$ được phân loại yếu là Co, As, Cd và riêng đối với $PM_{2.5}$ có S/N là 10,0 tuy nhiên vẫn được phân loại yếu do $PM_{2.5}$ nó không phải là một chất để nhận diện nguồn. Như vậy, tất cả các thông số đầu vào đều được giữ lại để chạy mô hình PMF và không có thông số nào thuộc nhóm xấu.

Bảng 3. 10: Bảng giá trị xử lý dữ liệu đầu vào của mô hình PMF

Thông số	S/N	Phân loại	Giá trị nhỏ nhất	25%	50%	75%	Giá trị lớn nhất
Al	Mạnh	8,5	0,021	0,337	0,48365	0,606	0,83
Cu	Mạnh	9,5	0,014	0,069	0,2016	0,436	0,713
Ni	Mạnh	10,0	0,001	0,0065	0,01975	0,03528	0,3158
Co	Yếu	0,4	0,00000	0,0002	0,0005	0,001	0,006
Mn	Mạnh	9,4	0,004	0,025	0,03005	0,04	0,07
Cr	Mạnh	9,4	0,001	0,043	0,1215	0,288	0,641
As	Yếu	0,2	0,00000	0,0009	0,00125	0,0064	0,032
Zn	Mạnh	9,1	0,059	0,361	0,60045	0,74493	1,061
Pb	Mạnh	10,0	0,004	0,03525	0,0515	0,06128	0,177
Cd	Yếu	0,2	0,0003	0,0009	0,0015	0,005	0,3016
Fe	Mạnh	8,9	0,038	0,25025	0,357	0,475	0,729
NH ₄ ⁺	Mạnh	10,0	0,696	3,0355	4,138	6,21	8,73
Cl ⁻	Mạnh	9,8	0,973	1,5985	2,627	3,636	5,959
NO ₃ ⁻	Mạnh	10,0	0,914	3,40875	4,7265	6,858	8,777
SO ₄ ²⁻	Mạnh	9,8	1,37	3,69025	5,38	7,5	10,057
K ⁺	Mạnh	9,8	0,3	0,812	1,11	2,065	4,049
Ca ²⁺	Mạnh	9,8	0,94	1,79	3,25	4,127	5,927
Na ⁺	Mạnh	10,0	1,15	2,6695	6,07	9,2495	12,388
Mg ²⁺	Mạnh	9,4	0,111	0,35	0,5015	0,89425	1,91
PM _{2.5}	Yếu	10,0	15,2	30,5	49,0	75,925	115,2

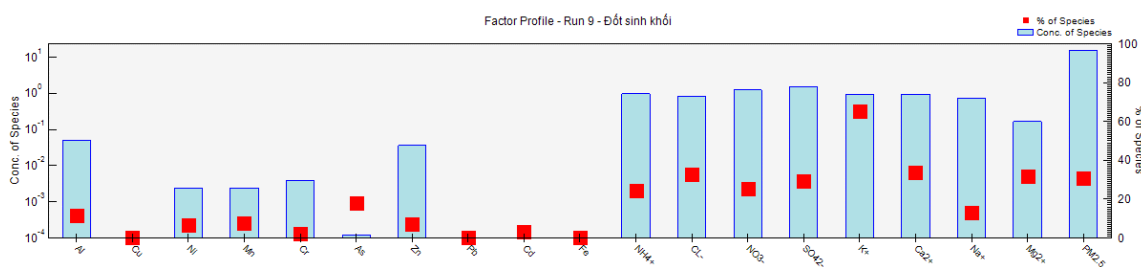
3.3.2.2. Kết quả của mô hình PMF

Số lượng các nhân tố khác nhau và độ không đảm bảo đo bổ sung khác nhau đã được sử dụng để xác định các nhân tố hợp lý nhất về mặt vật lý và thống kê. Các giải pháp cuối cùng được chọn dựa trên một số tiêu chí gồm: (1) Đánh giá sơ bộ kết quả đầu vào, (2) xu hướng, thời gian đối với từng yếu tố trong các mùa (mùa mưa, mùa

khô), (3) phân tích bằng error estimation methods (nghĩa là qua các lần chạy BS, DISP và BS-DISP của mô hình PMF), (4) giá trị R^2 của nồng độ $PM_{2.5}$ dự đoán so với đo được, (5) Phạm vi cấp nhận bởi Q/Q_{exp} cho phép. Để đáp ứng với mục tiêu nghiên cứu thì trong nghiên cứu này chúng tôi đã sử dụng mô hình PMF để chạy cho từng mùa (mùa mưa, mùa khô) để có thể đánh giá được từng nguồn gây ô nhiễm. Kết quả của mô hình được thể hiện từ hình 3.23 đến hình 3.29.

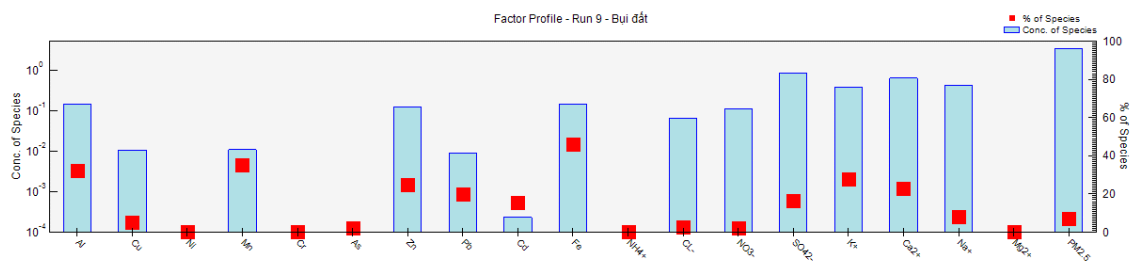
Nghiên cứu thực hiện dự đoán nguồn gốc và sự đóng góp của các nguồn thải đến hàm lượng kim loại và ions trong bụi $PM_{2.5}$ bằng mô hình PMF. Dựa vào kết quả 100 lần chạy tổ ưu mô hình, có 6 nhân tố được xác định đóng góp đáng kể vào hàm lượng kim loại và ions trong bụi $PM_{2.5}$. Đặc điểm của các nhân tố được trình bày cụ thể như sau:

Nhân tố thứ nhất với sự đóng góp lớn nhất của K^+ là một nguyên tố đặc trưng cho quá trình đốt các vật liệu hữu cơ như rơm rạ và sinh khối [162]. Kèm theo đó là đóng góp của các ion khác cũng là thành phần của nhân tố này là ion SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- . Nguồn từ đốt sinh khối đóng góp 30,6% vào tổng khối lượng bụi $PM_{2.5}$. Với sự đóng góp lớn tại khu vực có thể lý giải bởi 2 nguyên nhân chính như sau: Thứ nhất là trong thời gian này vừa trải qua công cuộc phòng chống dịch bệnh vừa diễn ra tại thành phố, nên các hoạt động khắc phục cho ngành y tế khá lớn. Do đó, công tác thu gom rác thải cho ngành y tế và lượng rác thải do con người hàng ngày tạo ra đa phần vẫn là công nghệ đốt, thêm vào đó công tác hỏa táng những người mất do covid rất lớn gần như quá tải vào lúc đó cũng có thể phát sinh một lượng bụi lớn. Thứ 2 là việc đốt rơm rạ ngoài trời cũng ảnh hưởng lớn đến CLKK. Điều này đã được chỉ ra trong nghiên cứu của Park và cộng sự (2020) và Hoàng Anh Lê (2013) đã chỉ ra việc đốt rơm cũng gây ra lượng bụi $PM_{2.5}$ lớn [3, 105] kết hợp với kết quả của mô hình HYSPLIT cho thấy trong thời gian này có các trọng số nồng độ bụi $PM_{2.5}$ được đóng góp ở khu vực đồng bằng ĐBSCL (Hình 3.19) đây là nơi tập ngành nông nghiệp trồng lúa là một trong những hoạt động sản xuất chính của người dân ở khu vực này. Sau khi thu hoạch, rơm rạ được xử lý bằng nhiều cách khác nhau nhưng chủ yếu là đốt.

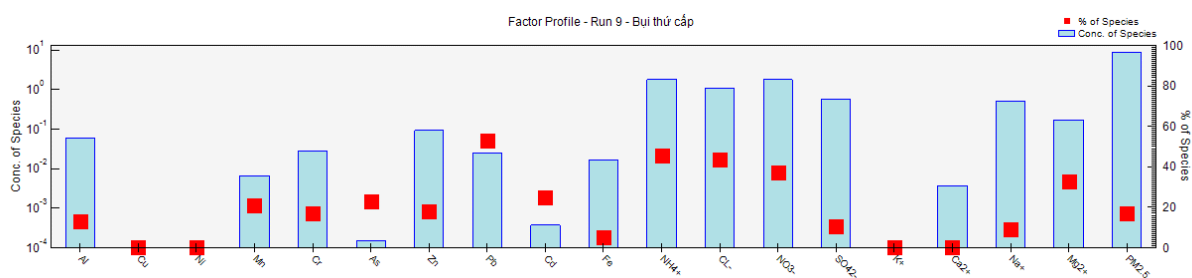


Hình 3. 21: Nhân tố đốt sinh khối

Nhân tố được chi phối chính bởi Al, Mn, Fe chiếm 6,9%. Với các nguyên tố đóng góp tương đối cao có liên quan đến yếu tố này là những nguyên tố được hiện diện rộng rãi trong vỏ trái đất và là nguyên tố đại diện cho yếu tố bụi đất [83, 121, 151]. Nguồn bụi đất bao gồm các hạt đất từ quá trình vận chuyển tầm xa và bụi đường lơ lửng từ các nguồn địa phương hoặc các địa phương lân cận vì hình thái các hạt thu được trong nghiên cứu này có kích thước rất nhỏ đa phần những hạt bụi mịn có đường kính khí động học $\leq 1,0 \mu\text{m}$ do đó chúng có thể di chuyển ở khoảng cách rất xa. Thêm vào đó, Fe và Mn là các nguyên tố chủ yếu đến từ vỏ Trái đất nhưng một số nghiên cứu đã chỉ ra rằng Fe, Mn cũng có thể liên quan đến ngành luyện kim [12, 78]. Theo như các nguyên tố được tính toán bởi hệ số EF cho thấy các nhân tố này đều có giá trị nhỏ hơn 10 (Hình 3.28) ở cả 2 mùa cho thấy các nhân tố này hoàn toàn bị ảnh hưởng bởi lớp vỏ có sẵn trong trái đất mà không bị ảnh hưởng bởi các ngành công nghiệp gây ra.

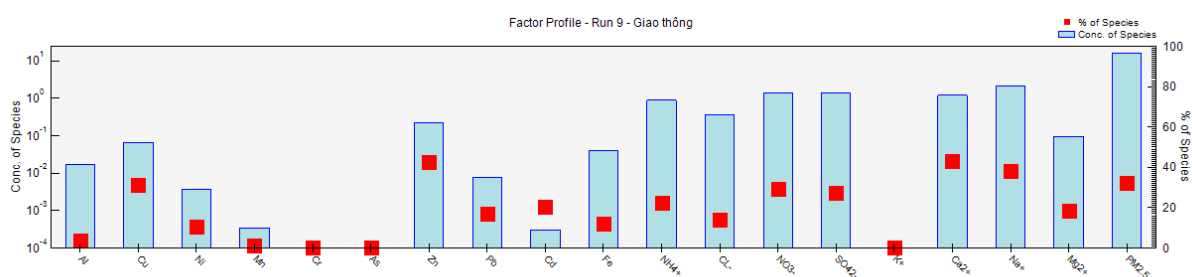


Hình 3. 22: Nhân tố bụi đất



Hình 3. 23: Nhân tố Bụi thứ cấp

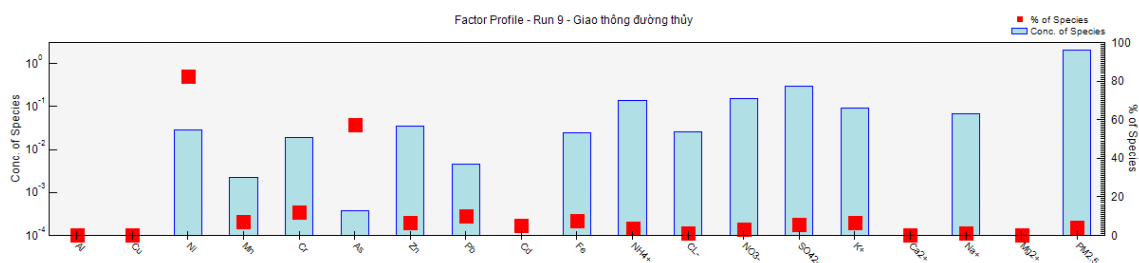
Nhân tố thứ 3 với tải lượng cao của các ion NH_4^+ , NO_3^- , Cl^- được cho là từ quá trình hình thành bụi thứ cấp [168]. Nguồn bụi thứ cấp chiếm 17% khối lượng bụi $\text{PM}_{2.5}$. Sự hình thành bụi thứ cấp được tạo điều kiện thuận lợi bởi nhiệt độ và độ ẩm theo từng mùa do quá trình oxy hóa NO_x bởi sự đóng góp cao trong mùa mưa. Các thành phần của nitrat được tạo thành từ phản ứng pha khí của các tiền chất khó có tính chất axit như HNO_3 và NH_3 . Sự hỗn hợp của Nitrat thứ cấp là đặc trưng của bụi ô nhiễm thứ cấp [28].



Hình 3. 24: Nhân tố Giao thông

Trong yếu tố này các thành phần chính của các kim loại có sự đóng góp cao bao gồm Cu, Zn, Pb và các ion bị chi phối bởi Ca^{2+} , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , NH_4^+ . Theo các nghiên cứu trước đây đã chỉ ra rằng Cu, Zn là những chất đánh dấu đáng tin cậy của khí thải xe cộ [80], Thêm vào đó lượng các nguyên tố như Zn, Pb cũng xuất hiện trong yếu tố này bởi độ mài mòn của phanh và lốp, quá trình mài mòn trên mặt đường sẽ đưa chúng trở lại với các hạt bụi trên mặt đường và NH_4^+ , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- là những yếu tố được tạo ra trong quá trình đốt cháy nhiên liệu bởi các xe cơ giới và quá trình mài mòn của các bộ phận xe cơ giới [56, 103]. Các hạt bụi tạo ra từ quá trình đốt trong động cơ bao gồm chủ yếu là cacbon graphit rắn với một lượng nhỏ

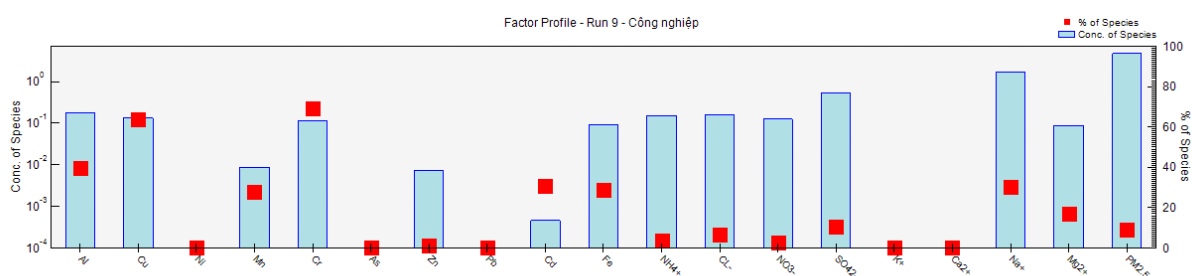
hơn tro kim loại, hydrocacbons và các hợp chất lưu huỳnh. Các hạt bụi này thường thường có đường kính 30-500 nm, trong khi các hạt bụi thứ cấp có kích thước dưới 30 nm và các hạt bụi không từ khí thải động cơ thường có kích cỡ micrometres. Về mặt phân bố kích cỡ hạt theo số lượng, bụi phân bố chủ yếu ở trong khoảng dưới 100 nm với hai đỉnh phân bố trong khoảng 10-30 nm và 50-80 nm, tùy theo từng điều kiện đo đạc khác nhau. Để nhận biết nguồn ô nhiễm từ giao thông, ta có thể dựa vào đặc trưng về phân bố kích cỡ và thành phần hóa học của bụi [132] đây cũng là nhân tố đóng góp lớn nhất đến chất lượng khu vực nghiên cứu trong thời gian lấy mẫu điều này hoàn toàn phù hợp kết quả phân tích phân bố kích thước hạt ở trên (Hình 3.14) phần lớn là các hạt có kích thước nhỏ chiếm ưu thế. Như vậy, nhân tố này được nhận định là có nguồn từ các phương tiện giao thông gây ra. Thật vậy, trong giai đoạn các mẫu được thu thập cho thấy các mẫu gần như các hoạt động tham gia giao thông vẫn còn bị hạn chế một phần mà chỉ có các phương tiện cứu chữa bệnh nhân, chở hàng hóa thiết yếu và các xe phòng chống dịch bệnh mới được hoạt động trên địa bàn khu vực nghiên cứu.



Hình 3. 25: Nhân tố Giao thông đường thủy

Nhân tố thứ 5 với đặc trưng tải lượng lớn của kim loại Ni, As. Theo các nghiên cứu cho thấy Ni là kim loại đánh dấu cho nguồn phát thải từ hoạt động giao thông đường thủy [181]. Thêm vào đó trong nghiên cứu Guttikunda (2009) cũng chỉ ra As là một trong những nguyên tố nhận biết bởi quá trình đốt dầu [46] có thể thấy hai nguyên tố này đều là các nguyên tố được phát sinh từ quá trình đốt cháy dầu nhiên liệu nặng (HFO) được sử dụng làm nhiên liệu của các tàu thuyền chở hàng hoạt động trên biển Đông và sông Mekong là những nơi tập chung rất nhiều tàu và các hoạt động đánh bắt cá diễn ra. Lượng chất thải theo các khối khí tượng ảnh hưởng

đến khu vực nghiên cứu trong thời gian lấy mẫu đã được theo dõi bằng mô hình HYSPLIT (Hình 3.21). Điều này hoàn toàn logic với nghiên cứu của Cohen và cộng sự (2010) lưu ý rằng quá trình đốt cháy HFO đã được sử dụng trong sà lan vận chuyển hàng hóa trên sông và kênh rạch ở Hà Nội [33]. Theo thống kê thì khu vực phía nam có tổng cộng 320 cảng biển hoạt động dọc bờ biển Việt Nam, trong đó 34 cảng biển gần đó chiếm hơn 60% tổng lượng hàng hóa thương mại của tất cả các cảng Việt Nam [49]. Cũng trong một nghiên cứu khác của Hồ Quốc Bằng và các cộng sự (2019) đã áp dụng kết hợp các phương pháp để tính toán lượng khí thải vào khí quyển từ các hoạt động của tàu thuyền trên biển chỉ ra rằng các cảng biển đóng góp lần lượt 5% và 15% tới tổng lượng phát thải TSP và SO₂ [54]. Do đó, quá trình đốt cháy HFO bằng cách vận chuyển không chỉ thải ra As và Ni mà còn nhiều chất gây ô nhiễm khác nhau bao gồm PM, các hợp chất vô cơ và hữu cơ và ảnh hưởng đến CLKK ở thành phố Biên Hòa, tỉnh Đồng Nai.



Hình 3. 26: Nhân tố Công nghiệp

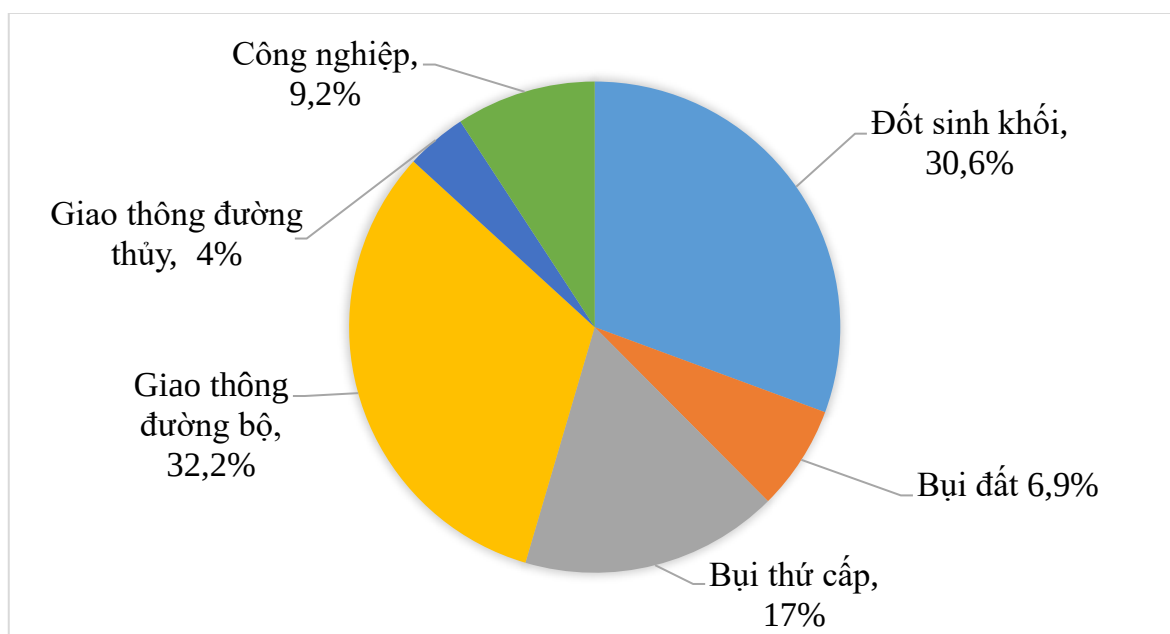
Nhân tố thứ 6 các nhân tố chỉ thị chính là các kim loại nặng như: Al, Cu, Mn, Cr, Cd, Fe. Mặc dù Fe, Mn là các nguyên tố chủ yếu đến từ vỏ Trái đất, nhưng một số nghiên cứu đã chỉ ra rằng Fe, Mn cũng có liên quan đến ngành luyện kim [12, 78]. Nhóm Cu, As, Co, Ni được gây ra bởi ngành công nghiệp kim loại màu và Fe được chỉ ra ảnh hưởng bởi ngành công nghiệp gang thép [46]. Ngoài ra Cr còn là một nguyên tố được sử dụng trong ngành luyện kim, vật liệu chịu lửa và sử dụng trong công nghiệp đúc (ví dụ: Đúc kim loại), mạ Cr trên ô tô và xe đạp tạo ra một bề mặt nhẵn bóng và có khả năng chống ăn mòn cao [93, 104]. Thành phố Biên Hòa hiện là thành phố tập trung nhiều KCN lớn nhỏ của Miền Nam - Việt Nam với đa dạng các

ngành nghề thì phát sinh một lượng kim loại nhất định được giải phóng dưới dạng hạt trong quá trình sản xuất là điều khó tránh khỏi. Thêm vào đó Mn, Cr, Cd và Al thì cũng được phát sinh bởi nguồn đốt than [46] đây là nguyên liệu chủ yếu được sử dụng bởi các nhà máy nhiệt điện. Hiện nay, Ở Miền Nam Việt Nam có 3 nhà máy nhiệt điện lớn điều này chỉ ra các nguồn tiềm năng vận tải các chất ô nhiễm tầm xa được minh chứng qua kết quả mô hình HYSPLIT còn cho thấy trọng số nồng độ của bụi $PM_{2.5}$ (Hình 3.21) qua cụm C3 vào mùa mưa và Cụm C5 vào mùa khô đây là các cụm đã đi đã đem theo các nguồn chất ô nhiễm từ các nhà máy nhiệt điện của Trung Quốc và các KCN đang dần tăng gia hoạt động trở lại sau thời gian bị giãn cách của đại dịch Covid - 19. Bên cạnh đó cụm C1 được phân tích bởi mô hình HYSPLIT dưới sự ảnh hưởng theo hướng Đông - Bắc còn có đóng góp của các hoạt động của ngành công nghiệp nặng vậy nên. Do vậy, kết quả phân tích của mô hình đưa ra thì cho thấy đây là nhân tố đã bị ảnh hưởng bởi nguồn công nghiệp không chỉ ở địa phương mà còn có sự đóng góp bởi hoạt động công nghiệp từ các địa phương lân cận.

Tiểu kết:

Qua các kết quả phân tích của mô hình cho thấy tại khu vực nghiên cứu đã bị ảnh hưởng bởi địa bàn và các nguồn phát thải tầm xa như chất ô nhiễm xuyên biên giới, giao thông đường thủy bởi các hạt được tìm thấy có kích thước vô cùng nhỏ nên chúng có khả năng di chuyển rất xa đã được đề cập đến bởi trọng số nồng độ của bụi $PM_{2.5}$ được đưa ra bởi mô hình HYSPLIT (Hình 3.20). Tại thành phố Biên Hòa là một khu vực tập chung rất nhiều các KCN, mật độ dân số lớn nhất cả nước và tiếp giáp với rất nhiều các tỉnh thành phố lớn như Bình Dương và thành phố Hồ Chí Minh các mẫu bụi thu được tiến hành mô hình PMF để định danh các nguồn thải đã ảnh hưởng đến chất lượng không khí trong thời gian lấy mẫu thu được các kết quả như sau: Nguồn thải từ giao thông và đốt sinh khối là hai nguồn đóng góp lớn nhất vào nồng độ $PM_{2.5}$ ở khu vực nghiên cứu, với đóng góp lần lượt là 32,2% và 30,6%. Điều này có thể lý giải bởi trong thời gian nghiên cứu là ngay sau thời điểm giãn cách của đại dịch Covid - 19 đã có diễn biến xấu ảnh hưởng rất nhiều đến đời sống người dân và người lao động dẫn đến các hoạt động sản xuất, các KCN lớn nhỏ khi hoạt động

trở lại đều rơi vào tình trạng thiếu công nhân và chưa thể hoạt động trở lại nên vào thời gian này chỉ có các hoạt động gia giao thông của người dân, phương tiện giao thông vận chuyển từ các khu công nghiệp, phục vụ cho công tác phòng chống dịch bệnh và các hoạt động xử lý rác thải y tế, rác thải do con người tạo ra và các lò hỏa táng người đã bị thiệt mạng bởi dịch bệnh gây ra đều quá tải vào lúc này. Chính vì vậy, Điều này dẫn đến sự đóng góp lớn tại khu vực nghiên cứu vào thời gian này chủ yếu là nguồn từ giao thông và hoạt động đốt sinh khối. Đồng thời cũng là nguyên nhân dẫn đến tỷ lệ phần trăm đóng góp của hoạt động công nghiệp không quá lớn chỉ với 9,2%. Tiếp đến là các nguồn như giao thông đường thủy, bụi đất và bụi thứ cấp có giá trị lần lượt là 4,0%, 6,9% và 17%.



Hình 3. 27: Phần trăm đóng góp của các nhân tố đến nồng độ bụi $PM_{2.5}$

3.4. Đánh giá mức độ ảnh hưởng của bụi $PM_{2.5}$ đến sức khỏe con người tại thành phố Biên Hòa - tỉnh Đồng Nai

3.4.1. Xác định các kim loại đã được làm giàu

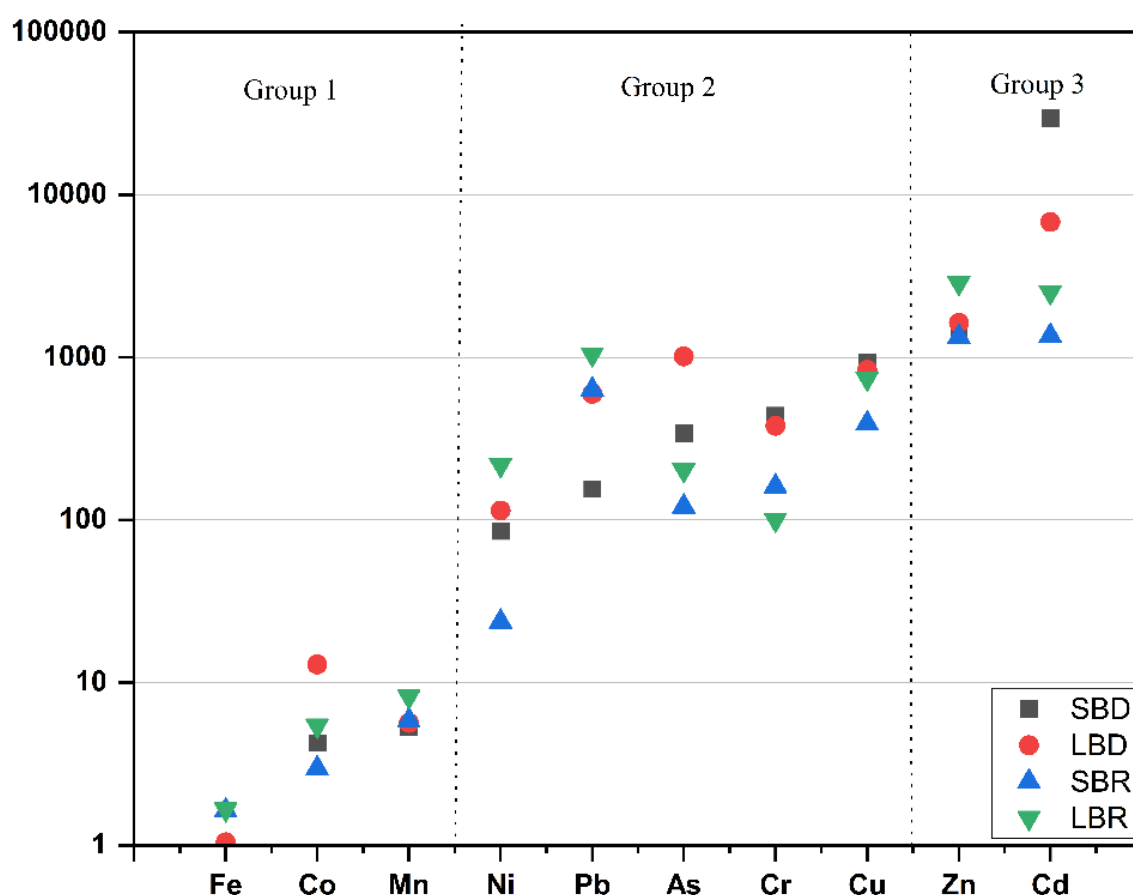
Qua kết quả phân tích thì cho thấy Al là nguyên tố có nồng độ phong phú nhất trong số các nguyên tố thuộc nhóm lớp vỏ trái đất như Fe, Mn. Do đó, nghiên cứu này sử dụng Al là nguyên tố tham chiếu điều này cũng phù hợp với kết quả đã được công bố trong nghiên cứu của Ji Yaqin (2006) cho rằng Al là nguyên tố tham chiếu

cho kết quả ổn định nhất trong các nguyên tố khác như Fe và Ti [149]. Các giá trị tham chiếu được xác định khối lượng có sẵn trong lớp vỏ trái đất được trình bày trong Bảng 3.12 [79]. Các kết quả hệ số làm giàu được áp dụng tính theo công thức 2.7 Được trình bày cụ thể trong các bảng ở phần phụ lục 4

Bảng 3. 11: Bảng giá trị các kim loại được xác định trong lớp vỏ trái đất

Nguyên tố	Giá trị	Nguyên tố	Giá trị	Nguyên tố	Giá trị
Al	$8,24 \times 10^4$	Co	$2,5 \times 10$	As	1,8
Cu	$6,0 \times 10$	Mn	$9,5 \times 10^2$	Zn	$7,0 \times 10$
Ni	$8,4 \times 10$	Cr	$1,02 \times 10^2$	Pb	$1,4 \times 10$
Cd	$1,5 \times 10^{-1}$	Fe	$5,63 \times 10^4$		

Nguồn: CRC handbook of chemistry and physics [79]



Hình 3. 28: Giá trị EF của các kim loại

Hình 3.30 hiển thị giá trị trung bình EF của từng kim loại theo mùa và từng vị trí lấy mẫu. Dựa trên giá trị EF thu được của 10 kim loại nặng còn lại bởi Al là nguyên tố tham chiếu được chia thành ba nhóm như sau:

Nhóm 1 gồm các nguyên tố Fe, Mn và Co cho thấy tất cả đều có giá trị $EF < 10$ do đó có thể nhận định rằng nhóm này chưa bị làm giàu mạnh mẽ bởi các hoạt động của con người và chủ yếu đến từ lớp vỏ của Trái đất hoặc bụi đất tạo thành từ các nguồn trong tự nhiên.

Nhóm 2 bao gồm các nhóm các nguyên tố Ni, Pb, As, Cr, Cu với các giá trị EF nằm trong khoảng từ 10 cho đến 1000. Tuy nhiên, kết quả này cho thấy phần lớn các nguyên tố đều có giá trị EF trung bình lớn hơn 100. Điều này cho thấy sự đóng góp mạnh mẽ đến từ các nguồn nhân tạo. Có thể kể đến như các hoạt động công nghiệp, giao thông, đốt sinh khối... gây ra.

Nhóm 3 là nhóm các nguyên tố có hệ số EF lớn hơn 1000 được xác định là các nguyên tố Zn và Cd. Trong đó giá trị EF của nguyên tố Cd trong bụi $PM_{2.5}$ vào mùa khô cao nhất là lên đến 37015,09 (bảng phụ lục 5). Đặc biệt theo IARC công bố Cd là các nguyên tố thuộc nhóm 1 của tác nhân gây ung thư [26]. Nhìn chung, các kim loại được làm giàu mạnh mẽ hơn vào mùa khô. Các nguyên tố Pb, As, Cr, Cu, Zn và Cd đều có giá trị $EF > 100$ ở cả mùa mưa và mùa khô. 6/7 nguyên tố này được IARC cảnh báo là rất có hại đối với sức khỏe con người [26].

3.4.2. Đánh giá mức độ ảnh hưởng của bụi $PM_{2.5}$ đến sức khỏe con người

Kim loại nặng được coi là chất gây ô nhiễm ảnh hưởng đến sức khỏe con người và làm chất lượng môi trường xấu đi. Vì vậy, trong mục này nghiên cứu cũng tập trung vào các kim loại được cho là đã bị làm giàu mạnh mẽ bởi các hoạt động của con người bao gồm As, Cd, Cr, Pb, Cu, Ni và Zn (nghiên cứu giả định tất cả Cr đều dưới dạng Cr (VI) để đánh giá nguy cơ tiềm ẩn tối đa từ nguyên tố này). Trong đó, Các kim loại nặng đã được chứng minh là nguy hại đối với sức khỏe con người bao gồm: As, Cd và Cr (VI) là các nguyên tố thuộc nhóm 1 của tác nhân gây ung thư, Pb và Co được xếp vào nhóm có thể gây ung thư (nhóm 2A) và Ni thuộc nhóm 2B trong số các chất gây ung thư [26]. Các giá trị tham số như IUR và RfD của những kim loại

được trích dẫn từ các cấp độ sàng lọc khu vực của US. EPA [79]. Chúng được trình bày dưới cụ thể dưới bảng 3.12 và kết quả tính toán thu được ở bảng 3.13

Bảng 3. 12: Bảng giá trị các tham số

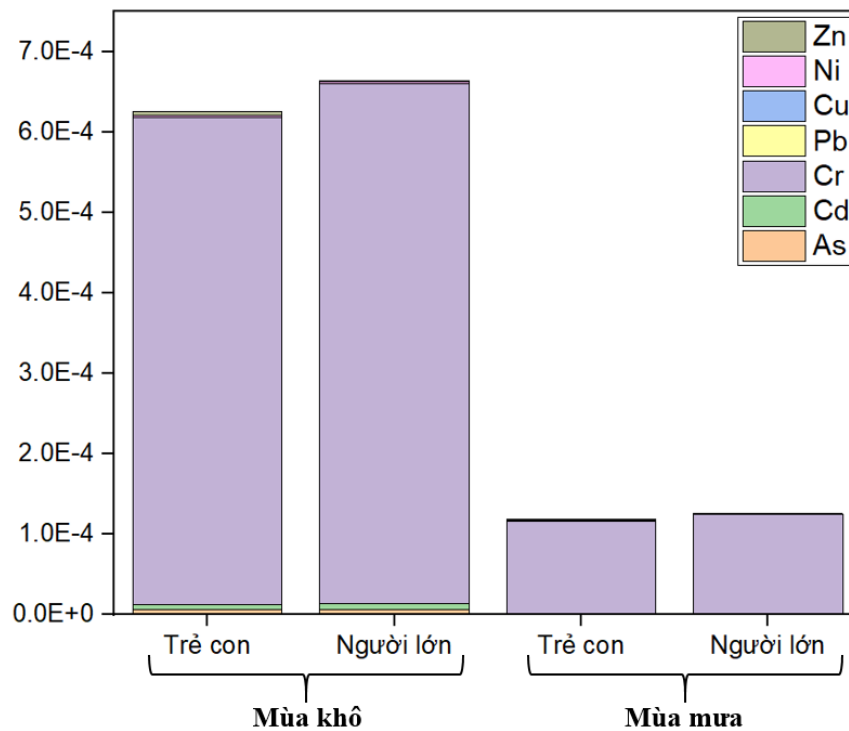
	As	Cd	Cr	Pb	Cu	Ni	Zn
RfD	0,0003	0,0005	0,003	0,0035	0,004	0,02	0,3
IUR	0,0043	0,0018	0,012	0,000012	-	0,00026	-

Nguồn: CRC handbook of chemistry and physics [79]

Bảng 3. 13: Kết quả rủi ro ung thư đối với người lớn và trẻ nhỏ

Mùa	Nhóm	Kim loại	EC _{ing}	DAD _{der}	HQ _{ing}	HQ _{der}	Hi	CR _{ing}	CR _{der}	TCR
Mùa khô	Trẻ con	As	0,0013	1,58E-07	0,0909	5,27E-04		5,87E-06	4,74E-11	5,87E-06
		Cd	0,0036	4,19E-07	0,3617	8,38E-04		6,51E-06	2,1E-10	6,51E-06
		Cr	0,0505	5,85E-06	0,5053	1,95E-04		6,06E-04	1,76E-08	6,06E-04
		Pb	0,0111	1,29E-06	0,0032	3,69E-04		1,34E-07	4,52E-09	1,39E-07
		Cu	0,0631	7,31E-06	0,0157	1,83E-03			2,93E-08	2,93E-08
		Ni	0,0097	1,13E-06	0,1085	5,66E-05		2,54E-06	2,26E-08	2,56E-06
		Zn	0,1208	1,4E-05	0,0004	4,67E-05			4,2E-06	4,20E-06
	Tổng						1,09			6,25 x 10 ⁻⁴
	Người lớn	As	0,0014	4,35E-08	0,0969	1,45E-04		6,26E-06	1,31E-11	6,26E-06
		Cd	0,0038	1,15E-07	0,3858	2,31E-04		6,95E-06	5,77E-11	6,95E-06
		Cr	0,0539	1,61E-06	0,5389	5,37E-04		6,47E-04	4,84E-09	6,47E-04
		Pb	0,0119	3,56E-07	0,0033	1,02E-04		1,43E-07	1,25E-09	1,44E-07
		Cu	0,0673	2,02E-06	0,0167	5,03E-04			8,06E-09	8,06E-09
		Ni	0,0104	3,12E-07	0,1157	1,56E-05		2,71E-06	6,23E-09	2,72E-06
		Zn	0,1288	3,86E-06	0,0004	1,28E-05			1,16E-06	1,16E-06

	Tổng						1,16			6,64 x 10 ⁻⁴
Mùa mưa	Trẻ con	As	0,0002	1,89E-08	0,0108	6,29E-05		7E-07	5,66E-12	7,00E-07
		Cd	0,0002	1,92E-08	0,0165	3,83E-05		2,98E-07	9,58E-12	2,98E-07
		Cr	0,0095	1,11E-06	0,0958	3,7E-04		1,15E-04	3,33E-09	1,15E-04
		Pb	0,0066	7,7E-07	0,0019	2,2E-04		7,98E-08	2,7E-09	8,25E-08
		Cu	0,0191	2,21E-06	0,0047	5,53E-04			8,86E-09	8,86E-09
		Ni	0,0021	2,39E-07	0,0229	1,19E-05		5,36E-07	4,78E-09	5,41E-07
		Zn	0,0674	7,81E-06	0,0002	2,6E-05			2,34E-06	2,34E-06
	Tổng						0,15			1,19 x 10 ⁻⁴
	Người lớn	As	0,0002	5,57E-09	0,0116	1,86E-05		7,47E-07	1,67E-12	7,47E-07
		Cd	0,0002	5,66E-09	0,0176	1,13E-05		3,18E-07	2,83E-12	3,18E-07
		Cr	0,0102	3,28E-07	0,1022	1,09E-04		1,23E-04	9,84E-10	1,23E-04
		Pb	0,0071	2,27E-07	0,0021	6,5E-05		8,51E-08	7,96E-10	8,59E-08
		Cu	0,0203	6,53E-07	0,0051	1,63E-04			2,61E-09	2,61E-09
		Ni	0,0022	7,05E-08	0,0244	3,53E-06		5,72E-07	1,41E-09	5,73E-07
		Zn	0,0719	2,31E-06	0,0002	7,68E-06			6,92E-07	6,92E-07
	Tổng				0,1632	0,0004	0,16			1,25 x 10 ⁻⁴



Hình 3. 29: Chỉ số HI

Để đánh giá nguy cơ ảnh hưởng đến sức khỏe con người tại thành phố Biên Hòa, tỉnh Đồng Nai vào mùa mưa và mùa khô trong nghiên cứu này để tài đã tiến hành xác định đối với khả năng hấp thụ qua quá trình hô hấp và tiếp xúc qua da ở hai đối tượng bao gồm người lớn và trẻ con. Kết quả thu được ở bảng là đánh giá mức độ rủi ro của 7 kim loại nhận do các hoạt động con người gây ra rất có thể đã ảnh hưởng đến sức khỏe. Giá trị thu được vào mùa mưa cho thấy $HI < 1$ ở cả người lớn và trẻ con điều này chứng minh rằng vào mùa mưa không có ảnh hưởng lâu dài và nguy cơ gây ảnh hưởng đến các bệnh mãn tính của việc hít phải các kim loại đó trong bụi $PM_{2.5}$. Ngược lại, vào mùa khô với giá trị $HI > 1$ cụ thể là trẻ con và người lớn lần lượt là 1,09 và 1,16 cho thấy rằng tổng rủi ro không gây ung thư đã vượt quá mức an toàn và tiềm ẩn các nguy cơ gây ra đối với các bệnh mãn tính [94]. Bên cạnh đó, sự đóng góp bởi quá trình hô hấp đến sức khỏe con người đối với tổng lượng HI là chủ yếu. Trong nghiên cứu của Pornpun Sakunkoo và cộng sự ở Thái Lan cũng cho kết quả tương tự là mức độ ảnh hưởng của các hạt bụi $PM_{2.5}$ gây ra bởi quá trình hô hấp [113]. Ngoài ra, nghiên cứu còn phát hiện ra rằng việc tiếp xúc với môi trường ÔNKK liên quan

đến quá trình sản xuất công nghiệp có tác động gây độc hơn đối với trẻ con [113]. Nguyên tố Cd và Cr tổng 2 kim loại này đóng góp 2/3 của tổng HI. Hai nguyên tố Cd và Cr là các nguyên tố đóng góp chính được nhận diện bởi nhân tố gây đến từ các hoạt động công nghiệp (hình 3.28). Thật vậy, trên địa bàn nghiên cứu và xung quanh (TP.HCM và Bình Dương) tập trung rất nhiều các KCN lớn nhỏ tuy nhiên trong thời gian này các hoạt động sản xuất còn bị hạn chế khá nhiều bởi ảnh hưởng của đại dịch Covid – 19 trước đó gây ra trên địa bàn. Nhưng các hoạt động công nghiệp được phát thải tầm xa đã được đề cập đến ở trên cũng có thể đem các nguyên tố trên đến khu vực nghiên cứu. Qua kết quả nghiên cứu thu được rất cần sự quan tâm của các nhà quản lý để đưa ra một kế hoạch dài hạn để giảm thiểu các tác động của hoạt động công nghiệp đến sức khỏe con người.

Ngoài ra, Cd và Cr là các chất gây ung thư thuộc nhóm 1 [26]. Tuy nhiên, kết quả nguy cơ gây ung thư cho thấy các giá trị Cd lại tương đối thấp và Cr là nguyên tố có giá trị cao nhất trong các nguyên tố ở cả mùa mưa và mùa khô với TCR dao động từ $1,23 \times 10^{-4}$ đến $6,47 \times 10^{-4}$. Do đó, kết quả TCR đối với từng nhóm đối tượng theo mùa cũng ở mức dao động trong khoảng 10^{-4} bởi Cr chi phối giá trị TCR khoảng 95%. Trong khi đóng góp lớn nhất vào giá trị TCR tại HCM là từ Cr chiếm 84% và ở Hà Nội là 67% [49]. Chúng có giá trị lần lượt là mùa khô là $6,25 \times 10^{-4}$ đối với trẻ con và $6,64 \times 10^{-4}$ đối với người lớn, mùa mưa có giá trị TCR thấp hơn nhưng không đáng kể lần lượt là $1,19 \times 10^{-4}$ đối với trẻ con và $1,25 \times 10^{-4}$ đối với người lớn. Kết quả này tương đồng với mức độ rủi ro được tính toán và công bố trong nghiên cứu ở thành phố Kitakyushu - Nhật Bản (2021) với tổng TCR là $1,2 \times 10^{-4}$ [155] từ đó đưa ra khuyến cáo là cần tăng cường kiểm soát nguồn kim loại có nguy cơ cao gây ảnh hưởng đến sức khỏe con người. Dựa trên kết quả đánh giá rủi ro sức khỏe tại khu vực nghiên cứu cho thấy mức độ phơi nhiễm với $PM_{2.5}$ vào mùa mưa thấp hơn mùa khô đáng kể. Với giá trị TCR cho thấy khả năng bị tác nhân gây ung thư do kim loại nặng gây nên tại khu vực nghiên cứu ở mức độ trung bình ($10^{-4} \leq TCR \leq 10^{-3}$) [155]. Tuy nhiên, cần lưu ý rằng với các giá trị TCR này được ước tính với mức đóng góp của toàn bộ là Cr (VI) để đưa ra cảnh báo ở mức cao nhất. Hiện nay tương đối ít các

nguyên cứu đánh giá mức độ phơi nhiễm của các kim loại nặng trong bụi PM_{2.5}. Các giá trị này có cao hơn so với giá trị tính toán được ở Hà Nội và TP.HCM lần lượt là $0,72 \times 10^{-5}$ và $1,18 \times 10^{-5}$ [123] điều này có thể lý giải bởi TCR trong nghiên cứu này chỉ đánh giá mức độ rủi ro đối với quá trình hô hấp mà chưa đánh giá qua da.

3.5. Đề xuất các giải pháp giảm thiểu chất ô nhiễm tại địa bàn nghiên cứu

Ô nhiễm bụi PM_{2.5} là một trong những vấn đề môi trường và sức khỏe nghiêm trọng đối với cả nước nói chung và tại thành phố Biên Hòa nói riêng. Trong nghiên cứu này, với các nguồn phát thải chính đến từ hoạt động giao thông, công nghiệp, đốt sinh khối, giao thông đường thủy, và bụi đất. Bên cạnh đó, Biên Hòa còn chịu ảnh hưởng từ các nguồn phát thải tầm xa, đặc biệt là hoạt động công nghiệp và giao thông tại các tỉnh lân cận cũng như sự lan tỏa bụi mịn từ khu vực Biển Đông và sông Mekong. Trước tình trạng này, việc đưa ra các giải pháp giảm thiểu ô nhiễm bụi mịn một cách cụ thể, toàn diện và phù hợp với đặc điểm kinh tế - xã hội của Biên Hòa là nhiệm vụ cấp thiết.

Trong bối cảnh đó, các giải pháp được đề xuất không chỉ nhằm kiểm soát ô nhiễm từ các nguồn phát thải tại chỗ mà còn cần xem xét cả tác động của các nguồn phát thải tầm xa. Từng nguồn ô nhiễm sẽ được phân tích cụ thể để xác định các biện pháp khả thi nhất, từ việc áp dụng công nghệ xử lý khí thải tiên tiến tại các khu công nghiệp, chuyển đổi nhiên liệu sạch cho các phương tiện giao thông, kiểm soát chặt chẽ hoạt động đốt sinh khối, đến việc quản lý hiệu quả các điểm nóng như khu vực xử lý dioxin tại sân bay Biên Hòa. Đồng thời, các biện pháp này cần được triển khai đồng bộ với các chính sách quản lý môi trường, hệ thống quan trắc hiện đại và sự tham gia tích cực của cộng đồng nhằm đảm bảo hiệu quả lâu dài.

Kết quả nghiên cứu đã chỉ ra rằng ÔNKK tại Biên Hòa không chỉ do các nguồn tại chỗ mà còn chịu ảnh hưởng lớn từ các nguồn xuyên biên giới. Điều này đặt ra một thách thức lớn đối với công tác quản lý môi trường cấp tỉnh. Luận án sẽ phân loại các nguồn ô nhiễm thành hai nhóm: Nhóm có thể kiểm soát được (giao thông, đốt sinh khối, bụi đất trong tỉnh) và nhóm cần hợp tác (các nguồn liên tỉnh và xuyên biên giới). Từ đó, Luận án đã đề xuất các giải pháp chính sách hai cấp độ, trong đó

tỉnh Đồng Nai tập trung kiểm soát các nguồn kiểm soát trực tiếp tại địa phương cụ thể như sau:

3.5.1. Các nhóm nguồn có thể kiểm soát được

- Kiểm soát, giảm thiểu từ hoạt động giao thông

Giao thông là một trong những nguồn phát thải bụi $PM_{2.5}$ lớn tại Biên Hòa, đặc biệt trên các tuyến đường chính như quốc lộ 1A, quốc lộ 51 và các khu vực trung tâm đông đúc như đường Nguyễn Ái Quốc và Phạm Văn Thuận. Để kiểm soát nguồn phát thải này, cần khuyến khích người dân sử dụng các phương tiện giao thông công cộng sạch như xe buýt chạy bằng khí nén tự nhiên (CNG) hoặc xe điện, thông qua việc mở rộng mạng lưới giao thông công cộng và áp dụng chính sách trợ giá vé. Thành phố cần xây dựng các tuyến đường dành riêng cho xe đạp hoặc xe điện nhỏ, đồng thời áp dụng quy định kiểm định khí thải nghiêm ngặt đối với phương tiện cá nhân, đặc biệt là xe cũ kỹ, không đạt chuẩn. Ngoài ra, việc áp dụng phí môi trường đối với các phương tiện cá nhân đi vào trung tâm thành phố sẽ góp phần giảm áp lực giao thông, khuyến khích sử dụng các phương tiện thân thiện với môi trường.

- Kiểm soát, giảm thiểu đối với nguồn đốt sinh khối

Theo kết quả luận án, đốt sinh khối được xác định là nguồn phát thải bụi quan trọng nhất, bao gồm sự đóng góp từ hoạt động đốt rơm rạ quy mô lớn tại Đồng bằng sông Cửu Long và các hoạt động đốt phụ phẩm nông nghiệp, rác thải tại các vùng ngoại ô Biên Hòa (như Trảng Dài, Tân Phong). Mặc dù có tỷ lệ phát thải cao, đây là nguồn có thể kiểm soát hiệu quả thông qua chính sách quản lý và sự tham gia của cộng đồng, do đó cần được ưu tiên xử lý trước.

Để giảm thiểu tác động từ nguồn này, luận án đề xuất các biện pháp cụ thể như: tổ chức các điểm thu gom phụ phẩm nông nghiệp để tái chế thành phân bón hữu cơ hoặc; đẩy mạnh tuyên truyền, khuyến khích người dân áp dụng phương pháp ủ phân compost thay vì đốt bỏ. Đồng thời, thành phố cần áp dụng chế tài mạnh mẽ đối với hành vi đốt tự phát, kết hợp xây dựng các trung tâm xử lý sinh khối liên tỉnh để xử lý tập trung, nhằm hạn chế tối đa việc phát tán bụi $PM_{2.5}$ vào môi trường không khí.

- *Kiểm soát, giảm thiểu đối với nguồn công nghiệp*

Tại thành phố Biên Hòa, các khu công nghiệp lớn như Amata, Biên Hòa 1, Biên Hòa 2 là những nguồn phát thải bụi $PM_{2.5}$ chính, gây ảnh hưởng nghiêm trọng đến môi trường không khí. Để giảm thiểu ô nhiễm từ nguồn này, thành phố cần yêu cầu tất cả các doanh nghiệp trong khu công nghiệp lắp đặt hệ thống xử lý khí thải hiện đại, đảm bảo đáp ứng tiêu chuẩn khí thải quốc gia. Đồng thời, cần triển khai hệ thống quan trắc tự động tại các khu công nghiệp để giám sát liên tục khí thải, giúp cơ quan quản lý phát hiện và xử lý kịp thời các vi phạm. Thành phố cũng cần khuyến khích các doanh nghiệp chuyển đổi sang sử dụng công nghệ sản xuất sạch và năng lượng tái tạo như năng lượng mặt trời hoặc sinh khối, giảm phụ thuộc vào nhiên liệu hóa thạch. Bên cạnh đó, việc xây dựng vùng đệm xanh bao quanh các khu công nghiệp, bằng cách trồng cây xanh và tạo các khu vực cách ly, sẽ giúp giảm thiểu sự lan truyền của bụi $PM_{2.5}$ ra khu vực dân cư.

- *Kiểm soát, giảm thiểu đối với bụi thứ cấp*

Nguồn bụi thứ cấp tại Biên Hòa chủ yếu phát sinh từ hoạt động xây dựng, giao thông và sự tái phát tán bụi từ bề mặt đường do gió hoặc phương tiện di chuyển. Để kiểm soát nguồn phát thải này, cần siết chặt quản lý các công trình xây dựng trên toàn thành phố. Cụ thể, các công trình cần được che chắn cẩn thận, rửa xe vận chuyển vật liệu trước khi ra vào công trường và thực hiện tưới nước định kỳ tại các khu vực xây dựng để giảm phát tán bụi. Thành phố cũng cần đầu tư vào việc quét dọn và hút bụi đường phố thường xuyên, đặc biệt tại các tuyến đường chính như quốc lộ 1A, quốc lộ 51 và các khu vực có lưu lượng giao thông cao. Ngoài ra, việc tăng cường phủ xanh các tuyến đường, công viên và khu vực đô thị sẽ giúp giảm thiểu bụi $PM_{2.5}$ thứ cấp, góp phần cải thiện chất lượng không khí và cảnh quan đô thị.

- *Kiểm soát, giảm thiểu đối với nguồn bụi đất.*

Nguồn bụi đất tại Biên Hòa không chỉ phát sinh từ các khu đất trống, các công trình xây dựng và bãi chứa vật liệu mà còn từ hoạt động đào xới tại các điểm nóng, đặc biệt là khu vực xử lý dự án tẩy độc dioxin tại sân bay Biên Hòa. Để giảm thiểu

tác động từ nguồn này, cần triển khai các biện pháp quản lý chặt chẽ tại khu vực dự án tẩy độc dioxin, bao gồm che chắn toàn bộ khu vực đào xúc và vận chuyển, đồng thời áp dụng các biện pháp phun nước liên tục để giảm bụi trong quá trình thi công. Các phương tiện vận chuyển đất nhiễm độc cần được che phủ kín và rửa sạch trước khi di chuyển ra khỏi công trường nhằm hạn chế phát tán bụi đất và chất độc ra môi trường xung quanh.

Bên cạnh đó, các khu vực đất trống trên địa bàn thành phố cần được phủ xanh bằng cách trồng cỏ, cây bụi hoặc các loại cây lâu năm để giảm sự phát tán bụi do gió. Đối với các bãi chứa vật liệu xây dựng, cần yêu cầu các đơn vị quản lý bãi che chắn kỹ lưỡng, thường xuyên phun nước và tuân thủ các quy định về quản lý môi trường. Thành phố cũng cần đầu tư vào việc quét dọn và hút bụi đường phố tại các tuyến đường chính như quốc lộ 51, đường Võ Nguyên Giáp, và các khu vực gần sân bay Biên Hòa, nơi chịu ảnh hưởng trực tiếp từ hoạt động đào xúc và vận chuyển.

3.5.2. Các nhóm nguồn cần phối hợp

- *Các giải pháp đối với các nguồn phát thải được vận chuyển từ xa.*

Biên Hòa cũng chịu ảnh hưởng từ nguồn phát thải bụi $PM_{2.5}$ tầm xa, đặc biệt từ các khu công nghiệp lân cận tại Bình Dương (nay là Thành Phố Hồ Chí Minh) và TP. Hồ Chí Minh, cũng như hoạt động đốt sinh khối ở các tỉnh miền Đông Nam Bộ. Để giảm thiểu tác động này, thành phố cần phối hợp với các tỉnh lân cận thông qua ký kết các thỏa thuận liên tỉnh về kiểm soát ÔNKK, đặc biệt là giám sát chặt chẽ khí thải từ các khu công nghiệp. Ngoài ra, cần triển khai các giải pháp kiểm soát đốt rơm rạ và phụ phẩm nông nghiệp tại các tỉnh lân cận như hỗ trợ chuyển đổi phụ phẩm thành phân bón hữu cơ hoặc nhiên liệu tái tạo. Đồng thời, cần thực hiện nghiên cứu mô hình hóa sự lan truyền của bụi $PM_{2.5}$ để xác định mức độ ảnh hưởng từ các nguồn thải xa, từ đó đưa ra giải pháp xử lý phù hợp. Bên cạnh đó, việc lắp đặt các tháp lọc không khí tại các khu vực chịu ảnh hưởng nặng và tăng cường phủ xanh đô thị là những giải pháp lâu dài và bền vững để giảm thiểu tác động từ nguồn tầm xa.

- *Kiểm soát, giảm thiểu đối với nguồn giao thông đường thủy*

Nguồn phát thải từ giao thông đường thủy tại thành phố Biên Hòa không chỉ xuất phát từ hoạt động trên sông Đồng Nai mà còn chịu ảnh hưởng từ các tuyến đường thủy lớn như sông Mekong và nguồn khí thải lan tỏa từ khu vực Biển Đông qua hoạt động vận tải biển và đánh bắt thủy sản. Để giảm thiểu ô nhiễm bụi $PM_{2.5}$ từ các nguồn này, cần thúc đẩy chuyển đổi động cơ tàu thuyền tại địa phương sang sử dụng nhiên liệu sạch như khí tự nhiên nén (CNG) hoặc dầu ít lưu huỳnh nhằm giảm phát sinh bụi và khí thải độc hại. Đồng thời, thành phố cần phối hợp với các tỉnh và cơ quan quản lý giao thông đường thủy trong vùng để xây dựng các chính sách chung về tiêu chuẩn khí thải đối với các phương tiện đường thủy hoạt động trên sông Mekong và các tuyến quốc tế liên quan đến Biển Đông.

Việc thiết lập các bến cảng và khu neo đậu tập trung tại Biên Hòa, được trang bị hệ thống kiểm soát khí thải, cũng là một giải pháp cần thiết nhằm kiểm soát lượng bụi $PM_{2.5}$ phát sinh tại chỗ. Ngoài ra, cần ban hành các quy định bắt buộc về bảo dưỡng định kỳ động cơ tàu thuyền và tăng cường kiểm tra các tàu thuyền vận hành trên sông Đồng Nai, sông Mekong cũng như các tuyến đường thủy kết nối với Biển Đông. Lắp đặt các thiết bị quan trắc khí thải tự động tại các khu vực bến cảng lớn như bến Hóa An, bến Gò Dầu, và các trạm trung chuyển đường thủy sẽ hỗ trợ hiệu quả cho việc giám sát và quản lý nguồn phát thải. Những biện pháp trên, nếu được thực hiện đồng bộ và phối hợp giữa các địa phương, sẽ giúp kiểm soát hiệu quả ô nhiễm bụi $PM_{2.5}$ từ nguồn giao thông đường thủy cả trong và ngoài thành phố Biên Hòa.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này đã thực hiện thu thập tổng cộng 42 mẫu bụi mịn PM_{2.5} vào mùa mưa và mùa khô và đã tiến hành phân tích đặc tính hóa lý, nguồn gốc và ảnh hưởng đến sức khỏe của chúng đối với con người đã thu được một số kết quả như sau:

Nồng độ bụi PM_{2.5} vào mùa khô cao hơn nhiều so với mùa mưa và hầu hết các mẫu đều cao hơn so với QCVN 05:2023/ BTNMT. Kích thước hạt chủ yếu là những hạt bụi mịn có đường kính khí động học $\leq 1,0 \mu\text{m}$.

Kết quả phân tích thành phần hóa học cho thấy các kim loại có nồng độ cao chủ yếu thuộc nhóm kim loại có nguồn gốc từ vỏ trái đất. Nồng độ kim loại và ion thể hiện sự biến động rõ rệt theo mùa, với xu hướng tăng cao trong mùa khô. Đáng chú ý, nồng độ trung bình của Cd trong mùa khô cao gấp khoảng 20 lần so với giá trị khuyến nghị của WHO ($0,005 \mu\text{g}/\text{m}^3$) cho giới hạn trung bình năm. Tổng hàm lượng kim loại thu được chiếm khoảng 5,29 - 7,64% tổng nồng độ các chất phân tích trong bụi PM_{2.5}. Trong nhóm cation, Na⁺ chiếm tỷ lệ cao nhất (12,47 - 22,23%), trong khi ở nhóm anion, SO₄²⁻ là thành phần chiếm ưu thế (16,57 - 18,67%). Những kết quả này cho thấy đặc trưng hóa học rõ rệt của bụi PM_{2.5} tại khu vực nghiên cứu, đồng thời phản ánh ảnh hưởng của điều kiện khí hậu đến sự phân bố các thành phần vô cơ trong các mẫu bụi.

Qua các kết quả phân tích của mô hình HYSPLIT cho thấy tại khu vực nghiên cứu đã bị ảnh hưởng bởi địa bàn và các nguồn phát thải tầm xa, chủ yếu xuất phát từ hướng Đông và Đông Bắc.

Mô hình PMF cho thấy nguồn thải từ giao thông và đốt sinh khối là hai nguồn đóng góp lớn nhất vào nồng độ PM_{2.5} ở khu vực nghiên cứu, với đóng góp lần lượt là 32,2% và 30,6%. Hoạt động công nghiệp không quá lớn chỉ với 9,2%. Tiếp đến là các nguồn như giao thông đường thủy, bụi đất và bụi thứ cấp có giá trị lần lượt là 4,0%, 6,9% và 17%.

Nghiên cứu đã xác định được 7/11 nguyên tố kim loại có hệ số EF > 100. Trong đó các nguyên tố Ni, Pb, As, Cr, Cu, Zn và Cd đều có giá trị EF > 100 ở cả mùa mưa và mùa khô. Đây đều là các nguyên tố được IARC cảnh báo là rất có hại đối với sức khỏe con người.

Giá trị HI thu được trong mùa mưa cho thấy HI < 1 ở cả người lớn và trẻ em, phản ánh rằng phơi nhiễm với các kim loại trong bụi PM_{2.5} không gây ra ảnh hưởng lâu dài hay nguy cơ đối với các bệnh mãn tính. Ngược lại, trong mùa khô, giá trị HI > 1 cụ thể 1,09 ở trẻ em và 1,16 ở người lớn cho thấy tổng rủi ro không gây ung thư đã vượt ngưỡng an toàn, hàm ý sự tồn tại của các nguy cơ ảnh hưởng đối với sức khỏe, đặc biệt là các tác động mãn tính khi phơi nhiễm kéo dài.

Kết quả TCR có giá trị lần lượt là mùa khô là $6,25 \times 10^{-4}$ đối với trẻ con và $6,64 \times 10^{-4}$ đối với người lớn, mùa mưa có giá trị TCR thấp hơn nhưng không đáng kể lần lượt là $1,19 \times 10^{-4}$ đối với trẻ con và $1,25 \times 10^{-4}$ đối với người lớn. Với giá trị TCR cho thấy có thể bị tác nhân gây ung thư do kim loại nặng gây nên tại khu vực nghiên cứu ở mức độ trung bình ($10^{-4} \leq \text{TCR} \leq 10^{-3}$).

Dựa trên các kết quả nghiên cứu, luận án đã đề xuất các giải pháp nhằm giảm thiểu ô nhiễm tại khu vực nghiên cứu. Các nguồn phát thải được phân loại thành hai nhóm: nhóm nguồn có thể kiểm soát trực tiếp (bao gồm: giao thông, đốt sinh khối, bụi đất trong tỉnh) và nhóm nguồn cần có sự phối hợp liên vùng (bao gồm: các nguồn phát thải liên tỉnh, xuyên biên giới). Cách phân loại này giúp định hướng các giải pháp quản lý phù hợp, khả thi và hiệu quả hơn trong việc giảm thiểu nồng độ chất ô nhiễm.

KIẾN NGHỊ

Kết quả nghiên cứu của Luận án cho thấy phần lớn các đều là các hạt kích thước nhỏ, có đường kính khí động học $\leq 1,0 \mu\text{m}$. Điều này rất đáng lưu ý và cần được quan tâm cho các hướng nghiên cứu ÔNKK tiếp theo trên địa bàn thành phố Biên Hòa, tỉnh Đồng Nai. Tác giả xin kiến nghị một số vấn đề như sau:

- Cần tiếp tục mở rộng quy mô cả về thời gian và không gian để có các nghiên cứu chuyên sâu về bụi mịn hoặc bụi siêu mịn để góp phần quản lý hiệu quả chất lượng không khí.

- Quy trình đã được áp dụng có thể chuyển giao cho các cơ quan, tổ chức hoạt động trong lĩnh vực nghiên cứu về vấn đề ÔNKK.
- Bộ dữ liệu về bụi $PM_{2.5}$, các nguồn ảnh hưởng đến khu vực nghiên cứu có thể được sử dụng cho việc viết báo cáo hiện trạng môi trường không khí địa phương, phục vụ tổng hợp chất lượng môi trường quốc gia.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH NGHIÊN CỨU KHOA HỌC VÀ ĐÀO TẠO

I. Các công trình đã công bố liên quan đến nội dung Luận Án:

1. Duy Linh Bui, Anh Le Hoang, Quang Khoi Ngo, Xuan Truong Nghiem, Chemical characterization, source apportionment, and health risk assessment nexus of PM_{2.5}-bound major heavy metals in Bien Hoa city, southern Vietnam, *Atmospheric Environment: X*, 17 (2023) 100209. <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2023.100209>.
2. Bui Duy Linh, Hoang Anh Le, Nghiem Xuan 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*, 30(13) (2023) 36533–36544. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24801-z>.
3. Bùi Duy Linh, Hoàng Anh Lê, Nghiêm Xuân Trường, Nguyễn Việt Thanh, Nguyễn Thị Năng, Nguyễn Ngọc Hưng, Đánh giá nồng độ và phân bố cấp hạt trong bụi mịn (PM_{2.5}) khu vực thành phố Biên Hòa, tỉnh Đồng Nai. *Tạp chí Khoa học Đại học Quốc gia Hà Nội: Các Khoa học Trái đất và Môi trường*, 38(3) (2022) 93-100. <https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.4862>.
4. Bùi Duy Linh, Hoàng Anh Lê, Nghiêm Xuân Trường, Nguyễn Thanh Tuấn, Lê Bảo Hưng, Nguyễn Đức Thắng, Phạm Thu Huyền, Quan trắc nồng độ và phân tích đặc tính của bụi mịn tại phường Long Bình, Thành phố Biên Hòa, tỉnh Đồng Nai, *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Nhiệt Đới*.
5. Hoàng Anh Lê, Bùi Duy Linh, Nguyễn Thanh Tuấn, Phạm Thu Huyền, Đặc điểm của PM_{2.5} tại Khu công nghiệp Long Bình, Thành phố Biên Hòa, Việt Nam: Nồng độ khối lượng, Thành phần hóa học, Phân bố nguồn và Đánh giá rủi ro sức khỏe. *Tạp chí Khoa học Đại học Quốc gia Hà Nội: Các Khoa học Trái đất và Môi trường*. <https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.5028>

II. Đề tài liên quan đến luận án do NCS thực hiện

1. Chủ nhiệm đề tài: “*Đánh giá hàm lượng kim loại nặng trong bụi mịn tại thành phố Biên Hòa, tỉnh Đồng Nai*”. Đề tài cấp phân viện, Hóa – Môi trường, thời gian thực hiện từ 6/2021 - 6/2022, đã nghiệm thu.
2. Chủ nhiệm đề tài: “*Đánh giá các nguồn thải và nguy cơ phơi nhiễm cộng đồng đối với bụi mịn PM_{2.5} trong không khí tại Thành phố Biên Hòa, tỉnh Đồng Nai*”. Đề tài cấp trung tâm Nhiệt đới Việt - Nga, thời gian thực hiện từ 10/2022 - 04/2024, đã nghiệm thu.
3. Thư ký đề tài: “*Nghiên cứu đặc trưng ô nhiễm PCDDs/PCDFs, dl – PCBs trong không khí của quá trình xử lý ô nhiễm Dioxin tại sân bay Biên Hòa*”. Đề tài cấp trung tâm Nhiệt đới Việt - Nga, thời gian thực hiện từ 06/2022 - 06/2024, đang thực hiện.

III. Tham gia trợ giảng

- Học phần Quan trắc môi trường (EVS3254), năm học 2022 - 2023.
- Học phần Quan trắc môi trường (EVS3254), năm học 2023 - 2024.

IV. Tham gia hội nghị khoa học

- Tham gia báo cáo “PM_{2.5} levels, chemical composition, and source identification in Bien Hoa City, Dong Nai, VietNam” tại Hội nghị khoa học về Trái đất và môi trường Việt Nam lần thứ 3, TP Quy Nhơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Tài liệu tiếng Việt:

1. Bệnh viện nhi đồng thành phố, *Chuẩn tăng trưởng - WHO 2007*. Khoa dinh dưỡng tiết chế, 2017.
2. Bùi Quang Trung, Nguyễn Đức L-ượng, Bùi Thị Hiếu, Mạc Văn Đạt, Nguyễn Văn Duy, Phạm Minh Chinh, Hoàng Tuấn Viet, Hoàng Xuân Hòa, *Đánh giá thành phần ion và cacbon trong bụi mịn PM_{2.5} trong một giai đoạn mùa đông tại một khu vực đô thị ở Hà Nội*. Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng - ĐHXDHN, 2022. 16(2V): p. 54-64.
3. Hoàng Anh Lê, Nguyễn Thị Thu Hạnh, Lê Thùy Linh, *Ước tính lượng khí phát thải do đốt rom rạ tại đồng ruộng trên địa bàn tỉnh Thái Bình*. VNU Journal of Science: Earth Environmental Sciences, 2013. 29(2).
4. IQAir, *Biên Hòa Air Quality index (AQI) and Việt Nam Air Pollution*. <https://www.iqair.cn/cn-en/vietnam/tinh-dong-nai/bien-hoa>.
5. Nguyễn Thị Thu Thủy, *Nghiên cứu mức độ và phân đóng góp của các dạng nguồn thải chính tới nồng độ bụi NaNo trong không khí*. 2019.
6. Nguyễn Thị Tuyết Nam, Trinh Nguyễn Ngọc Thu, Nguyễn Thị Minh ,Thế Phạm, *Đặc điểm và ảnh hưởng của nghịch nhiệt đến nồng độ bụi mịn (PM_{2.5}) tại thành phố Hồ Chí Minh*. Tạp chí khí tượng thủy văn, 2023.
7. Phạm Ngọc Hồ, Đồng Kim Loan, Trịnh Thị Thanh, *Giáo trình cơ sở môi trường không khí*. 2009.
8. QCVN05:2023/BTNMT, *Quy chuẩn kỹ thuật Quốc gia về Chất lượng không khí*. 2023.
9. Thông tin Dân số, *Dữ liệu từ Liên hợp quốc và Cục Thống kê*. 2025.
10. Trịnh Thị Hạnh Thủy, Nguyễn Thế Đức Thư, Nguyễn Thị Anh Thắm, Trịnh Thị, *Nghiên cứu ảnh hưởng của hiện tượng nghịch nhiệt đến hàm lượng bụi PM_{2.5} trong môi trường không khí tại Hà Nội*. 2018, Tạp chí Khoa học ĐHQGHN: Các Khoa học Trái đất và Môi trường.

11. Vũ Xuân Đán, Trương Thanh Cảnh, *Đánh giá phơi nhiễm bụi cá nhân PM_{2,5} và nguồn phát sinh của người dân sống gần 2 trạm quan trắc môi trường ở TPHCM*. Science technology, 2017. 20(M1-2017): p. 26.

Tài liệu tiếng anh:

12. Adeyemi, Adewale Molnar, Peter Boman, Johan Wichmann, Janine, *Source apportionment of fine atmospheric particles using positive matrix factorization in Pretoria, South Africa*. Environmental Monitoring Assessment, 2021. 193: p. 1-21.
13. Agency, California Environmental Protection, *SOP MLD 064: Analysis of Anions and Cations in PM_{2.5} Speciation Samples by Ion Chromatography, Revision 1.0*,. 2018.
14. Agency, California Environmental Protection, *SOP MLD 055: Standard operating procedure (SOP) for the determination of PM_{2,5} mass in ambient air by gravimetric analysis, Revision 2.0*. California, USA, 2018.
15. Agency, United States Environmental Protection, *Compendium Method IO-3.5. Determination of Metals in Ambient Particulate Matter Using Inductively Coupled Plasma/Mass Spectrometry (ICP/MS) Compendium of Methods for the Determination of Inorganic Compounds in Ambient Air*. 1999.
16. Arruti, Axel Fernández-Olmo, Ignacio Irabien, Ángel, *Evaluation of the contribution of local sources to trace metals levels in urban PM_{2.5} and PM₁₀ in the Cantabria region (Northern Spain)*. Journal of environmental monitoring, 2010. 12(7): p. 1451-1458.
17. Aziz, Effa Nabilla Kasem, Asem Suhaili, Wida Susanty Haji Zhao, Peijiang *Convolution Recurrent Neural Network for Daily Forecast of PM₁₀ Concentrations in Brunei Darussalam*. CET Journal-Chemical Engineering Transactions, 2021. 83.
18. Bar, Somnath Parida, Bikash Ranjan Mandal, Shyama Prasad Pandey, Arvind Chandra Kumar, Navneet Mishra, Bibhudatta *Impacts of partial to complete*

- COVID-19 lockdown on NO₂ and PM_{2.5} levels in major urban cities of Europe and USA*. Cities, 2021. 117: p. 103308.
19. Becagli, S. Sferlazzo, D. M. Pace, G. di Sarra, A. Bommarito, C. Calzolari, G. Ghedini, C. Lucarelli, F. Meloni, D. Monteleone, F. Severi, M. Traversi, R. Udisti, R., *Evidence for heavy fuel oil combustion aerosols from chemical analyses at the island of Lampedusa: a possible large role of ships emissions in the Mediterranean*. Atmos. Chem. Phys., 2012. 12(7): p. 3479-3492.
 20. Behera, Sailesh N Sharma, Mukesh *Investigating the potential role of ammonia in ion chemistry of fine particulate matter formation for an urban environment*. Science of the Total Environment, 2010. 408(17): p. 3569-3575.
 21. Behrooz, Reza Dahmardeh Kaskaoutis, DG Grivas, G Mihalopoulos, *Human health risk assessment for toxic elements in the extreme ambient dust conditions observed in Sistan, Iran*. Chemosphere, 2021. 262: p. 127835.
 22. Bie, Shujun Yang, Lingxiao Zhang, Yan Huang, Qi Li, Jingshu Zhao, Tong Zhang, Xiongfei Wang, Pengcheng Wang, Wenxing, *Source appointment of PM_{2.5} in Qingdao port, east of China*. Science of the Total Environment, 2021. 755: p. 142456.
 23. Bui Thi Hieu, Nguyen Duc Luong, Nguyen Thi Phuong Mai, Bui Quang Trung, Nguyen Van Duy, Mac Van Dat *Chemical characterization, source apportionment, and human health risk assessment of PM_{2.5} in an urban area in Hanoi, Vietnam*. Air Quality, Atmosphere Health, 2023. 16(1): p. 149-163.
 24. Bui Thi Hieu, Nguyen Thi Phuong Mai *Characterization of PM₁₀ bounded trace metals in industrial, traffic, and residential areas in Bac Giang, Vietnam: Environmental and health implications*. Human Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2023. 29(1): p. 58-79.
 25. Cancer, International Agency for Research on, *Agents classified by the IARC Monographs*. <http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/index.php>, 2012. 1-106.

26. Cancer, International Agency for Research on. *Agents Classified by the IARC Monographs, Volumes 1–111 (online)*. 2014.
27. Cha, Yesol Song, Chang-Keun Jeon, Kwon-ho Yi, Seung-Muk, *Factors affecting recent PM_{2.5} concentrations in China and South Korea from 2016 to 2020*. Science of The Total Environment, 2023. 881: p. 163524.
28. Chen, Rui Zhao, Yehui Tian, Yingze Feng, Xin Feng, Yinchang, *Sources and uncertainties of health risks for PM_{2.5}-bound heavy metals based on synchronous online and offline filter-based measurements in a Chinese megacity*. Environment International, 2022. 164: p. 107236.
29. Chen, Sheng-Po Lu, Cheng-Hsuan McQueen, Jeffery Lee, Pius *Application of satellite observations in conjunction with aerosol reanalysis to characterize long-range transport of African and Asian dust on air quality in the contiguous US*. Atmospheric Environment, 2018. 187: p. 174-195.
30. Chen, TB Zheng, YM Chen, Huang Zheng, GD, *Background concentrations of soil heavy metals in Beijing*. Huan jing ke xue= Huanjing kexue, 2004. 25(1): p. 117-122.
31. Cheng, Yuan He, Ke-bin Du, Zhen-yu Zheng, Mei Duan, Feng-kui Ma, Yong-liang, *Humidity plays an important role in the PM_{2.5} pollution in Beijing*. Environmental Pollution, 2015. 197: p. 68-75.
32. Cohen, David D Crawford, Jagoda Stelcer, Eduard, Bac Vuong Thu, *Characterisation and source apportionment of fine particulate sources at Hanoi from 2001 to 2008*. Atmospheric Environment, 2010. 44(3): p. 320-328.
33. Cohen, David D Crawford, Jagoda Stelcer, Eduard, Bac Vuong Thu *Long range transport of fine particle windblown soils and coal fired power station emissions into Hanoi between 2001 to 2008*. Atmospheric Environment, 2010. 44(31): p. 3761-3769.
34. Draxler, RR Rolph, GD *HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) model access via NOAA ARL READY website*

- (<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>), NOAA Air Resources Laboratory. Silver Spring, MD, 2010. 25.
35. Duong Huu Huy, Nguyen Doan Thien Chi, To Thi Hien, *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*. VNUHCM Journal of Natural Sciences, 2019. 2: p. 130-137.
 36. Duong Huy Huu, Nguyen Chi Doan Thien, Nguyen Phu Ly Sy, To Hien Thi, *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*. Science Technology Development Journal: Natural Sciences, 2018. 2(5): p. 130-137.
 37. Duong Huy Huu, Nguyen Chi Doan Thien, Nguyen Phu Ly Sy, To Hien Thi *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*. VNUHCM Journal of Natural Sciences, 2018. 2(5): p. 130-137.
 38. Duy Linh Bui, Anh Le Hoang, Xuan Truong Nghiem, Viet Thanh Nguyen, Thi Nang Nguyen, Ngoc Hung Nguyen, *Evaluation of Mass Concentration and Size Distribution of Fine Particles (PM_{2.5}) in Bien Hoa City, Dong Nai Province*. 2022. 38(3).
 39. EPA, *IO Compendium Method IO-3.1: Compendium of Methods for the Determination of Inorganic Compounds in Ambient Air: Selection, Preparation and Extraction of Filter Material*. 1999, EPA/625/R.
 40. Frontera, Antonio Martin, Claire Vlachos, Kostantinos Sgubin, Giovanni, *Regional air pollution persistence links to COVID-19 infection zoning*. Journal of Infection, 2020. 81(2): p. 318-356.
 41. Gadi, Ranu Sharma, Sudhir Kumar Mandal, Tuhin Kumar, *Source apportionment and health risk assessment of organic constituents in fine ambient aerosols (PM_{2.5}): a complete year study over National Capital Region of India*. Chemosphere, 2019. 221: p. 583-596.

42. Gaffney, J.S Marley, *Introduction to urban aerosols and their impacts. Urban Aerosols and Their Impacts: Lessons Learned from the World Trade Center Tragedy*. 2005.
43. Galindo, N. Yubero, E. Nicolás, J. F. Varea, M. Crespo, *Characterization of metals in PM1 and PM10 and health risk evaluation at an urban site in the western Mediterranean*. Chemosphere, 2018. 201: p. 243-250.
44. Galon-Negru, Alina Giorgiana Olariu, Romeo Iulian Arsene, Cecilia *Size-resolved measurements of PM2. 5 water-soluble elements in Iasi, north-eastern Romania: Seasonality, source apportionment and potential implications for human health*. Science of the Total Environment, 2019. 695: p. 133839.
45. Guo, H. Lee, S. C. Ho, K. F. Wang, X. M. Zou, *Particle-associated polycyclic aromatic hydrocarbons in urban air of Hong Kong*. Atmospheric Environment, 2003. 37(38): p. 5307-5317.
46. Guttikunda, Sarath *Urban particulate pollution source apportionment*. SIM-air working paper series, 2009: p. 16-2009.
47. Heal, Mathew R Hibbs, Leon R Agius, Raymond M Beverland, Iain J *Total and water-soluble trace metal content of urban background PM10, PM2. 5 and black smoke in Edinburgh, UK*. Atmospheric Environment, 2005. 39(8): p. 1417-1430.
48. Heo, Jongbae Wu, Bo Abdeen, Ziad Qasrawi, Radwan Sarnat, Jeremy A Sharf, Geula Shpund, Kobby Schauer, James *Source apportionments of ambient fine particulate matter in Israeli, Jordanian, and Palestinian cities*. Environmental pollution, 2017. 225: p. 1-11.
49. Hien To Thi, Chi Nguyen Doan Thien, Huy Duong Huu, Le Hoang Anh, Oram David E Forster, Grant L Mills, Graham P Baker, Alex R, *Soluble trace metals associated with atmospheric fine particulate matter in the two most populous cities in Vietnam*. Available at SSRN 4028380, 2022.

50. Hien To Thi, Huy Duong Huu, Dominutti Pamela A, Thien Chi Nguyen Doan, Hopkins James, R. Shaw Marvin Forster, Grant Mills, Graham, Le Hoang Anh, Oram David, *Comprehensive volatile organic compound measurements and their implications for ground-level ozone formation in the two main urban areas of Vietnam*. Atmospheric Environment, 2022. 269: p. 118872.
51. Hien To Thi, Kameda Takayuki Takenaka, Norimichi Bandow, Hiroshi *Distribution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons with particle size in urban aerosols at the roadside in Ho Chi Minh City, Vietnam*. Atmospheric Environment, 2007. 41(8): p. 1575-1586.
52. Ho Bang Quoc, Vu Hoang Ngoc Khue, Nguyen Thi Thu Thuy, Nguyen Thoai Tam, Nguyen Thi Thuy Hang, Khoa Nguyen Thi Dang, Le Phu Vo. *Photochemical modeling of PM_{2.5} and design measures for PM_{2.5} reduction: A case of Ho Chi Minh City, Vietnam*. in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. IOP Publishing.
53. Ho, KF Cao, JJ Lee, SC Chan, Chak K, *Source apportionment of PM_{2.5} in urban area of Hong Kong*. Journal of hazardous materials, 2006. 138(1): p. 73-85.
54. Ho Quoc Bang, Vu Hoang Ngoc Khue, Nguyen Thoai Tam, Nguyen Thi Thuy Hang, Nguyen Thi Thu Thuy *A combination of bottom-up and top-down approaches for calculating of air emission for developing countries: a case of Ho Chi Minh City, Vietnam*. Air Quality, Atmosphere Health, 2019. 12: p. 1059-1072.
55. Hopke, Philip K. *A guide to positive matrix factorization*. in *Workshop on UNMIX and PMF as Applied to PM_{2.5}*. 2000.
56. Hsu, Chin-Yu Chiang, Hung-Che Lin, Sheng-Lun Chen, Mu-Jean Lin, Tzu-Yu Chen, Yu-Cheng *Elemental characterization and source apportionment of PM₁₀ and PM_{2.5} in the western coastal area of central Taiwan*. Science of the Total Environment, 2016. 541: p. 1139-1150.

57. Hu, M He, LY Huang, XF, *Physical-Chemical Characteristics, Sources and Formation Mechanisms of Airborne Fine Particles and Ultrafine Particles in Beijing*. Science Press: Beijing, 2009: p. 282.
58. Hu, Xin Zhang, Yun Ding, Zhuhong Wang, Tijian Lian, Hongzhen Sun, Yuanyuan Wu, Jichun *Bioaccessibility and health risk of arsenic and heavy metals (Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn and Mn) in TSP and PM_{2.5} in Nanjing, China*. Atmospheric environment, 2012. 57: p. 146-152.
59. Huang, X. F. Zou, B. B. He, L. Y. Hu, M. Prévôt, A. S. H. Zhang, Y. H, *Exploration of PM_{2.5} sources on the regional scale in the Pearl River Delta based on ME-2 modeling*. Atmos. Chem. Phys., 2018. 18(16): p. 11563-11580.
60. Hussein, Tareq Juwhari, Hassan Al Kuisi, Mustafa Alkattan, Hamza Lahlouh, Bashar Al-Hunaiti, Afnan, *Accumulation and coarse mode aerosol concentrations and carbonaceous contents in the urban background atmosphere in Amman, Jordan*. Arabian Journal of Geosciences, 2018. 11(20): p. 617.
61. Huy Duong Huu, To Thi Hien, Takenaka Norimichi *Influence of urban outflow on water-soluble ions in PM_{2.5} and > PM_{2.5} particles at a suburban Ho Chi Minh City site, Vietnam*. Atmospheric Research, 2022. 272: p. 106144.
62. Huy Duong Huu, Hien To Thi, Takenaka Norimichi *Influence of urban outflow on water-soluble ions in PM_{2.5} and > PM_{2.5} particles at a suburban Ho Chi Minh City site, Vietnam*. Atmospheric Research, 2022. 272: p. 106144.
63. Jakob, Alana Hasibuan, Saberina Fiantis, Dian *Empirical evidence shows that air quality changes during COVID-19 pandemic lockdown in Jakarta, Indonesia are due to seasonal variation, not restricted movements*. Environmental Research, 2022. 208: p. 112391.
64. Jiang, Nan, Zhe Dong, Yuanqian Xu, Fei Yu, Shasha Yin, Ruiqin Zhang, and Xiaoyan Tang, *Characterization of PM₁₀ and PM_{2.5} source profiles of fugitive dust in Zhengzhou, China*. Aerosol Air Quality Research, 2018. 18(2): p. 314-329.

65. Jiang, Sabrina YN Yang, Fenhuan Chan, Ka Lok Ning, Zhi Water solubility of metals in coarse PM and PM_{2.5} in typical urban environment in Hong Kong. *Atmospheric pollution research*, 2014. 5(2): p. 236-244.
66. Khalili, Nasrin R. Scheff, Peter A. Holsen, Thomas M, *PAH source fingerprints for coke ovens, diesel and, gasoline engines, highway tunnels, and wood combustion emissions*. *Atmospheric Environment*, 1995. 29(4): p. 533-542.
67. Kim, Bong Mann Seo, Jihoon Kim, Jin Young Lee, Ji Yi Kim, Yumi, *Transported vs. local contributions from secondary and biomass burning sources to PM_{2.5}*. *Atmospheric Environment*, 2016. 144: p. 24-36.
68. KPFRS, London, *Edinburgh Dublin Philos Mag. J. Sci*, 1901. 2: p. 559.
69. Le Hoang Anh, Oanh Nguyen Thi Kim, *Integrated assessment of brick kiln emission impacts on air quality*. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010. 171(1): p. 381-394.
70. Leal, R Ramírez Ponce, HE Esparza Moller, JA Duarte, *SEM and TEM Characterization of Inorganic Atmospheric Particles in Air Quality Program*. *Microscopy and Microanalysis*, 2006. 12(S02): p. 364-365.
71. Lee, Hanlim Park, Seung S Kim, Kyung W Kim, Young J *Source identification of PM_{2.5} particles measured in Gwangju, Korea*. *Atmospheric Research*, 2008. 88(3-4): p. 199-211.
72. Li, Deping Liu, Jianguo Zhang, Jiaoshi Gui, Huaqiao Du, Peng Yu, Tongzhu Wang, Jie Lu, Yihuai Liu, Wenqing Cheng, Yin *Identification of long-range transport pathways and potential sources of PM_{2.5} and PM₁₀ in Beijing from 2014 to 2015*. *Journal of Environmental Sciences*, 2017. 56: p. 214-229.
73. Li, Li Li, Zhengqiang Dubovik, Oleg Zheng, Xu Li, Zhanhua Ma, Jinji Wendisch, Manfred, *Effects of the shape distribution of aerosol particles on their volumetric scattering properties and the radiative transfer through the atmosphere that includes polarization*. *Applied Optics*, 2019. 58(6): p. 1475-1484.

74. Li, Li Meng, Rui Lei, Yalin Wu, Sanmang Jiang, Yong *Human health risk assessment of heavy metals from PM_{2.5} in China's 29 provincial capital cities*. Environmental Science Pollution Research, 2022. 29(42): p. 63028-63040.
75. Li, Peng-hui Yu, Jie Bi, Cheng-liang Yue, Jun-jie Li, Qian-qian Wang, Li Liu, Jinpeng Xiao, Zhimei Guo, Liqiong Huang, Bi-jie *Health risk assessment for highway toll station workers exposed to PM_{2.5}-bound heavy metals*. Atmospheric Pollution Research, 2019. 10(4): p. 1024-1030.
76. Li, Tingting Li, Jun Jiang, Hongxing Chen, Duohong Zong, Zheng Tian, Chongguo Zhang, Gan *Source Apportionment of PM_{2.5} in Guangzhou Based on an Approach of Combining Positive Matrix Factorization with the Bayesian Mixing Model and Radiocarbon*. Atmosphere, 2020. 11, DOI: 10.3390/atmos11050512.
77. Li, Xiaoling Sun, Wenqiang Zhao, Liang Cai, Jiuju *Emission characterization of particulate matter in the ironmaking process*. Environmental technology, 2019. 40(3): p. 282-292.
78. Li, Xing Yan, Caiqing Wang, Chunying Ma, Jingjin Li, Wanxin Liu, Junyi Liu, Yue, *PM_{2.5}-bound elements in Hebei Province, China: Pollution levels, source apportionment and health risks*. Science of the Total Environment, 2022. 806: p. 150440.
79. Lide, David R, *CRC handbook of chemistry and physics*. Vol. 85. 2004: CRC press.
80. Lim, Jong-Myoung Lee, Jin-Hong Moon, Jong-Hwa Chung, Yong-Sam Kim, Ki-Hyun *Source apportionment of PM₁₀ at a small industrial area using Positive Matrix Factorization*. Atmospheric Research, 2010. 95(1): p. 88-100.
81. Lin, Yaolin Zou, Jiale Yang, Wei Li, Chun-Qing *A Review of Recent Advances in Research on PM_{2.5} in China*. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018. 15, DOI: 10.3390/ijerph15030438.

82. Liu, Na Yu, Ye He, Jianjun Zhao, Suping *Integrated modeling of urban-scale pollutant transport: application in a semi-arid urban valley, Northwestern China*. Atmospheric Pollution Research, 2013. 4(3): p. 306-314.
83. Liu, Yun Wang, Ruoshui Zhao, Tingning Zhang, Yan Wang, Jinghua Wu, Hongxuan Hu, Ping, *Source apportionment and health risk due to PM10 and TSP at the surface workings of an underground coal mine in the arid desert region of northwestern China*. Science of The Total Environment, 2022. 803: p. 149901.
84. Liu, Zhen Shen, Luming Yan, Chengyu Du, Jianshuang Li, Yang Zhao, Hui *Analysis of the Influence of Precipitation and Wind on PM2. 5 and PM10 in the Atmosphere*. Advances in Meteorology, 2020. 2020: p. 1-13.
85. Lonati, Giovanni, S Ozgen, and Michele Giugliano, *Primary and secondary carbonaceous species in PM2. 5 samples in Milan (Italy)*. Atmospheric Environment, 2007. 41(22): p. 4599-4610.
86. Luong, Ly M. T. Phung, Dung Sly, Peter D. Morawska, Lidia Thai, Phong K., *The association between particulate air pollution and respiratory admissions among young children in Hanoi, Vietnam*. Science of The Total Environment, 2017. 578: p. 249-255.
87. Ly Bich Thuy, Matsumi, Yutaka Vu, Tuan V. Sekiguchi, Kazuhiko, Nguyen Thu Thuy, Pham Chau Thuy, Nghiem Trung Dung Ngo, Ich Hung Kurotsuchi, Yuta Nguyen, Thu Hien Nakayama, Tomoki, *The effects of meteorological conditions and long-range transport on PM2.5 levels in Hanoi revealed from multi-site measurement using compact sensors and machine learning approach*. Journal of Aerosol Science, 2021. 152: p. 105716.
88. Lyda, Espitia-Pérez, Jiménez-Vidal Luisa, and Espitia-Pérez Pedro, *Particulate Matter Exposure: Genomic Instability, Disease, and Cancer Risk*, in *Environmental Health*, M. Abdelhadi, Editor. 2019, IntechOpen: Rijeka. p. Ch. 1.

89. Martins, Nuno R. and Guilherme Carrilho da Graça, *Impact of PM_{2.5} in indoor urban environments: A review*. Sustainable Cities and Society, 2018. 42: p. 259-275.
90. Mass, Clifford *The uncoordinated giant: Why US weather research and prediction are not achieving their potential*. Bulletin of the American Meteorological Society, 2006. 87(5): p. 573-584.
91. Minh, Vo Thi Tam, Tran Trung Tin, and To Thi Hien, *PM_{2.5} forecast system by using machine learning and WRF model, a case study: Ho Chi Minh City, Vietnam*. Aerosol Air Quality Research, 2021. 21(12): p. 210108.
92. MONRE, *Environmental status of Vietnam in the 2016 - 2020 period*, Ministry of Natural Resources and Environment (MONRE). 2021.
93. Morrison, Robert D Murphy, Brian L, *Environmental forensics: contaminant specific guide*. 2010: Elsevier.
94. Murari, Vishnu Singh, Nandita Ranjan, Rohit Singh, RS Banerjee, Tirthankar *Source apportionment and health risk assessment of airborne particulates over central Indo-Gangetic Plain*. Chemosphere, 2020. 257: p. 127145.
95. Neto, Osmar Pinto, Iara RCA Pinto, and Osmar Pinto Jr, *Lightning during the COVID-19 pandemic in Brazil*. Journal of atmospheric solar-terrestrial physics, 2020. 211: p. 105463.
96. Nguyen Duc Luong, Nares Chuersuwat, Hoang Tuan Viet, Bui Quang Trung, *Impact of biomass burning sources during the high season on PM_{2.5} pollution observed at sampling sites in Hanoi, Vietnam and Chiang Rai, Thailand*. APN Science Bulletin, 2022. Volume 12(Issue 1): p. 56-65.
97. Nguyễn Thế Hùng, Kosinova Irina, Đặng Thị Lan Anh, *Modeling Air Pollution In Dong Nai Province, Vietnam*. Geography, Environment, Sustainability, 2020. 13(2): p. 166-174.
98. Nguyen Tuyet Nam Thi, Nguyen Xuan Du, Nguyen Thi Hoa, *Emission source areas of fine particulate matter (PM_{2.5}) in Ho Chi Minh City, Vietnam*. Atmosphere, 2023. 14(3): p. 579.

99. Nowak, David J Hirabayashi, Satoshi Bodine, Allison Greenfield, Eric, *Tree and forest effects on air quality and human health in the United States*. Environmental pollution, 2014. 193: p. 119-129.
100. Organization, World Health, *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. 2021: World Health Organization.
101. Organization, World Health, *World Air Quality Report 2019*. 2019.
102. Paatero, P., Eberly, S., Brown, S.G., Norris, G.a, *Methods for estimating uncertainty in factor analytic solutions*. Atmos. Meas. Tech. 7:781–797., 2014.
103. Pant, Pallavi and Roy M Harrison, *Critical review of receptor modelling for particulate matter: a case study of India*. Atmospheric Environment, 2012. 49: p. 1-12.
104. Papp, JF and BR Lipin, *Chromite Industrial Minerals & Rocks: Commodities. Markets, Uses*, 7th ed., SME, 2006.
105. Park, Eun Ha Heo, Jongbae Kim, Ho Yi, Seung-Mu, *Long term trends of chemical constituents and source contributions of PM_{2.5} in Seoul*. Chemosphere, 2020. 251: p. 126371.
106. Park, Jieun Kim, Hyewon Kim, Youngkwon Heo, Jongbae Kim, Sang-Woo Jeon, Kwonho Yi, Seung-Muk Hopke, Philip K, *Source apportionment of PM_{2.5} in Seoul, South Korea and Beijing, China using dispersion normalized PMF*. Science of The Total Environment, 2022. 833: p. 155056.
107. Pham Chau Thuy, Hoang Anh Le, L. H. Tuyen and N. T. Dung, *Size distribution and contribution of particles from rice straw open burning to the atmosphere in Hanoi*. 2020. 58: p. 94-94.
108. Ramirez Leal, Roberto Cruz Campas, Martin Morales Romero, Daniel Cota Arriola, Octavio, *Radioactive Particles in Samples of PM₁₀ by SEM-EDS*. Microscopy and Microanalysis, 2021. 27(S1): p. 3364-3365.

109. Rattanapotanan, Tanawan, Thunyapat Thongyen, Surat Bualert, Parkpoom Choomanee, Panwadee Suwattiga, Thitima Rungrattanaubon, Titinan Utavong, Jitlada Phupijit, and Nitchakarn Changplaiy, *Secondary sources of PM_{2.5} based on the vertical distribution of organic carbon, elemental carbon, and water-soluble ions in Bangkok*. Environmental Advances, 2023. 11: p. 100337.
110. Rosal, Roberto, *Morphological description of microplastic particles for environmental fate studies*. Marine Pollution Bulletin, 2021. 171: p. 112716.
111. Sah, Dinesh Verma, Puneet Kumar Kumari, K Maharaj Lakhani, Anita *Characterisation, Sources and Health Risk of Heavy Metals in PM_{2.5} in Agra, India*. Exposure Health, 2022: p. 1-12.
112. Sahu, Shovan Kumar Sharma, Shubham Zhang, Hongliang Chejarla, Venkatesh Guo, Hao Hu, Jianlin Ying, Qi Xing, Jia Kota, Sri Harsha *Estimating ground level PM_{2.5} concentrations and associated health risk in India using satellite based AOD and WRF predicted meteorological parameters*. Chemosphere, 2020. 255: p. 126969.
113. Sakunkoo, Pornpun Thonglua, Theerachai Sangkham, Sarawut Jirapornkul, Chananya, *Human health risk assessment of PM_{2.5}-bound heavy metal of anthropogenic sources in the Khon Kaen Province of Northeast Thailand*. Heliyon, 2022. 8(6).
114. Samek, L Stegowski, Z Styszko, K Furman, L Zimnoch, M Skiba, A Kistler, *Seasonal variations of chemical composition of PM_{2.5} fraction in the urban area of Krakow, Poland: PMF source attribution*. Air Quality, Atmosphere Health, 2020. 13: p. 89-96.
115. Sawlani, Ravi, Rajesh Agnihotri, and C Sharma, *Chemical and isotopic characteristics of PM_{2.5} over New Delhi from September 2014 to May 2015: Evidences for synergy between air-pollution and meteorological changes*. Science of the Total Environment, 2021. 763: p. 142966.

116. Shi, Yuanyuan Ji, Yanfeng Sun, Hui Hui, Fei Hu, Jianchen Wu, Yaxi Fang, Jianlong Lin, Hao Wang, Jianxiang Duan, Huiling, *Nanoscale characterization of PM_{2.5} airborne pollutants reveals high adhesiveness and aggregation capability of soot particles*. Scientific reports, 2015. 5(1): p. 1-10.
117. Shi, Zongbo Shao, Longyi Jones, Timothy Peter Whittaker, Andrew Gordon Lu, Senlin Berube, Kelly Ann He, Taoe Richards, Roy John *Characterization of airborne individual particles collected in an urban area, a satellite city and a clean air area in Beijing, 2001*. Atmospheric environment, 2003. 37(29): p. 4097-4108.
118. Sun, Xiang Wang, Haoqi Guo, Zhigang Lu, Peili Song, Fuzhong Liu, LiLiu, Jiaxin ose, Neil L ang, Fengwen *Positive matrix factorization on source apportionment for typical pollutants in different environmental media: a review*. Environmental Science: Processes Impacts, 2020. 22(2): p. 239-255.
119. Tahir, Norhayati Mohd Suratman, Suhaimi Fong, Foo Toon Hamzah, Mohd Suhaimi Latif, Mohd Talib *Temporal distribution and chemical characterization of atmospheric particulate matter in the eastern coast of Peninsular Malaysia*. Aerosol Air Quality Research, 2013. 13(2): p. 584-595.
120. Talifu, Dilinuer Wuji, Ayikezi Tursun, Yalkunjan Kang, Hong Hu, Ying Guo, Yuhong Shao, Longyi *Micro-morphological characteristics and size distribution of PM_{2.5} in the Kuitun-Dushanzi Region of Xinjiang, China*. Aerosol Air Quality Research, 2015. 15(6): p. 2258-2269.
121. Tang, Jie Yang, Zhuo Tui, Yue Wang, Ju *Fine particulate matter pollution characteristics and source apportionment of Changchun atmosphere*. Environmental Science Pollution Research, 2022: p. 1-12.
122. Tian, Yingze Wang, Xiaoning Zhao, Peng Shi, Zongbo Harrison, Roy M, *PM_{2.5} source apportionment using organic marker-based chemical mass balance modeling: Influence of inorganic markers and sensitivity to source profiles*. Atmospheric Environment, 2023. 294: p. 119477.

123. To Thi Hien, Duong Huu Huy Pamela A. Dominutti, Nguyen Doan Thien Chi, James R. Hopkins Marvin Shaw, Grant Forster Graham Mill, Hoang Anh Le, David Oram, *Comprehensive volatile organic compound measurements and their implications for ground-level ozone formation in the two main urban areas of Vietnam*. Atmospheric Environment, 2022. 269: p. 118872.
124. To Thi Hien, Nguyen Doan Thien Chi, Nguyen Thao Nguyen, Le Xuan Vinh, Norimichi Takenaka, Duong Huu Huy, *Current status of fine particulate matter (PM_{2.5}) in Vietnam's most populous city, Ho Chi Minh City*. Aerosol and Air Quality Research, 2019. 19(10): p. 2239-2251.
125. Tuvjargal, N. Enkhtsetseg, L. Shagjjamba, D. Zuzaan, P., *Morphological study of PM_{2.5} by SEM-EDS in Ulaanbaatar*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019. 704(1): p. 012012.
126. USAID, *United States Announces New \$73 Million Commitment for Dioxin Remediation at Bien Hoa Air Base*. 2023.
127. USEPA, *Ambient Air Quality Surveillance Siting Criteria for Open Path Analyzers. Appendix E. Probe and Monitoring Path Siting Criteria for Ambient Air Quality Monitoring*, 2006.
128. USEPA, *Particulate Matter (PM) Basics*. 2021.
129. USEPA, *United States Environmental Protection Agency (US EPA): Our Nation's Air, summarizes the nation's air quality status and trends through 2020*. 2020.
130. Vallius, M Janssen, NAH Heinrich, J Hoek, G Ruuskanen, J Cyrys, J Van Grieken, R De Hartog, JJ Kreyling, WG Pekkanen, J *Sources and elemental composition of ambient PM_{2.5} in three European cities*. Science of the total environment, 2005. 337(1-3): p. 147-162.
131. Vos, Peter EJ Maiheu, Bino Vankerkom, Jean anssen, Stijn, *Improving local air quality in cities: to tree or not to tree?* Environmental pollution, 2013. 183: p. 113-122.

132. Vu, Tuan V Delgado-Saborit, Juana Maria Hrrison, Roy M *Particle number size distributions from seven major sources and implications for source apportionment studies*. Atmospheric Environment, 2015. 122: p. 114-132.
133. Wang, Baoqing Tang, Zhenzhen Cai, Ningning Niu, Honghong *The characteristics and sources apportionment of water-soluble ions of PM_{2.5} in suburb Tangshan, China*. Urban Climate, 2021. 35: p. 100742.
134. Wang, Chong Jia, Mingjiao Xia, Haiyun Wu, Yunbin Wei, Tianwen Shang, Xiang Yang, Chengyun Xue, Xianghui Dou, Xiankang, *Relationship analysis of PM_{2.5} and boundary layer height using an aerosol and turbulence detection lidar*. Atmospheric Measurement Techniques, 2019. 12(6): p. 3303-3315.
135. Wang, Jianhua Ogawa, Susumu *Effects of Meteorological Conditions on PM_{2.5} Concentrations in Nagasaki, Japan*. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2015. 12, 9089-9101 DOI: 10.3390/ijerph120809089.
136. Wang, Shenbo Wang, Lingling Wang, Nan Ma, Shuangliang Su, Fangcheng Zhang, Ruiqin *Formation of droplet-mode secondary inorganic aerosol dominated the increased PM_{2.5} during both local and transport haze episodes in Zhengzhou, China*. Chemosphere, 2021. 269: p. 128744.
137. Wang, Wenju Chen, Chun Liu, Dan Wang, Mingshi Han, Qiao Zhang, Xuechun Feng, Xixi Sun, Ang Mao, Pan Xiong, Qinqing *Health risk assessment of PM_{2.5} heavy metals in county units of northern China based on Monte Carlo simulation and APCS-MLR*. Science of the Total Environment, 2022. 843: p. 156777.
138. Wang, Xuesong Zhao, Wenwu Liu, Shiliang An, Yiming Pereira, Paulo *Ecosystems impact on aeolian dust emissions in Inner Mongolia from 2001 to 2018*. Geoderma, 2022. 422: p. 115938.
139. WATSON JR, JOHN GEORGE, *Chemical element balance receptor model methodology for assessing the sources of fine and total suspended particulate*

- matter in Portland, Oregon*. 1979: Oregon Graduate Institute of Science and Technology.
140. WHO, *Fact sheet: Ambient (outdoor) air pollution*. (2021).
 141. WHO, *Air quality guidelines for Europe*. 2000. 10: p. 1-273.
 142. WHO. *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. 2021 (Accessed on: 12 March 2022)]; Available from: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/345329/9789240034228-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
 143. WHO Multicentre Growth Reference Study Group de Onis, Mercedes, *WHO Child Growth Standards based on length/height, weight and age*. Acta paediatrica, 2016. 95: p. 76-85.
 144. Wu, X. Nethery, R. C. Sabath, M. B. Braun, D. Dominici, *Air pollution and COVID-19 mortality in the United States: Strengths and limitations of an ecological regression analysis*. 2020. 6(45): p. eabd4049.
 145. Wu, Zhijun Hu, Min Lin, Peng Liu, Shang Wehner, Birgit Wiedensohler, *Alfred Particle number size distribution in the urban atmosphere of Beijing, China*. Atmospheric Environment, 2008. 42(34): p. 7967-7980.
 146. Xie, RK Seip, HM Leinum, JR Winje, T Xiao, JS *Chemical characterization of individual particles (PM₁₀) from ambient air in Guiyang City, China*. Science of the total environment, 2005. 343(1-3): p. 261-272.
 147. Xue, Huaqin Liu, Guijian Zhang, Hong Hu, Ruoyu Wang, Xin, *Elemental Composition, Morphology and Sources of Fine Particulates (PM_{2.5}) in Hefei City, China*. Aerosol and Air Quality Research, 2019. 19(8): p. 1688-1696.
 148. Yang, Bo-Yi Guo, Yuming Bloom, Michael S. Xiao, Xiang Qian, Zhengmin Liu, Echu Howard, Steven W. Zhao, Tianyu Dong, Guang-Hui, *Ambient PM₁ air pollution, blood pressure, and hypertension: Insights from the 33 Communities Chinese Health Study*. Environmental Research, 2019. 170: p. 252-259.

149. Yaqin, Ji, *Using the Enrichment Factor Method to Evaluate the Pollution of Airborne Dust Elements in Urban Soil in my country*. Journal of Nankai University: Natural Science Edition, 2006: p. 94-99.
150. Young, Li-Hao Li, Chiao-Hsin Lin, Ming-Yeng Hwang, Bing-Fang Hsu, Hui-Tsung Chen, Yu-Cheng Jung, Chau-Ren Chen, Kuan-Chi Cheng, Dung-Hung Wang, Ven-Shing *Field performance of a semi-continuous monitor for ambient PM_{2.5} water-soluble inorganic ions and gases at a suburban site*. Atmospheric Environment, 2016. 144: p. 376-388.
151. Yuan, Chung-Shin Wong, Kwok-Wai Tseng, Yu-Lun Ceng, Jun-Hao Lee, Cheng-En Lin, Chitsan *Chemical significance and source apportionment of fine particles (PM_{2.5}) in an industrial port area in East Asia*. Atmospheric Pollution Research, 2022. 13(4): p. 101349.
152. Zhang, Hui-hui Li, Zheng Liu, Yu Xinag, Ping Cui, Xin-yi Ye, Hui Hu, Bao-lan Lou, Li-ping, *Physical and chemical characteristics of PM_{2.5} and its toxicity to human bronchial cells BEAS-2B in the winter and summer*. Journal of Zhejiang University-SCIENCE B, 2018. 19(4): p. 317-326.
153. Zhang, Jin Li, Ruifei Zhang, Xiaoying Bai, Yun Cao, Pan Hua, Pei *Vehicular contribution of PAHs in size dependent road dust: a source apportionment by PCA-MLR, PMF, and Unmix receptor models*. Science of the Total Environment, 2019. 649: p. 1314-1322.
154. Zhang, Qijun Mao, Hongjun Zhang, Yanjie Wu, Lin *Characterization of PM-Bound Heavy Metal at Road Environment in Tianjin: Size Distribution and Source Identification*. Atmosphere, 2021. 12, DOI: 10.3390/atmos12091130.
155. Zhang, Xi, Yuko Eto, and Masahide Aikawa, *Risk assessment and management of PM_{2.5}-bound heavy metals in the urban area of Kitakyushu, Japan*. Science of The Total Environment, 2021. 795: p. 148748.
156. Zhang, Yong Jiang, Wulin, *Pollution characteristics and influencing factors of atmospheric particulate matter (PM_{2.5}) in Chang-Zhu-Tan area*. IOP

- Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018. 108(4): p. 042047.
157. Zhao, Mengfei Huang, Zhongsi Qiao, Ting Zhang, Yuankai Xiu, Guangli Yu, Jianzhen *Chemical characterization, the transport pathways and potential sources of PM_{2.5} in Shanghai: Seasonal variations*. Atmospheric Research, 2015. 158: p. 66-78.
 158. Zheng, Na Liu, Jingshuang Wang, Qichao Liang, Zhongzhu, *Health risk assessment of heavy metal exposure to street dust in the zinc smelting district, Northeast of China*. Science of the total environment, 2010. 408(4): p. 726-733.
 159. Zhou, GuangQiang Xie, Ying Wu, JianBin Yu, ZhongQi Chang, LuYu Gao, Wei, *WRF-Chem based PM_{2.5} forecast and bias analysis over the East China Region*. China Environmental Science, 2016. 36(8): p. 2251-2259.
 160. Zoran, Maria A Savastru, Roxana S Savastru, Dan M Tautan, Marina N *Assessing the relationship between surface levels of PM_{2.5} and PM₁₀ particulate matter impact on COVID-19 in Milan, Italy*. Science of the total environment, 2020. 738: p. 139825.
 161. (WHO), World Health Organization, *Ambient (outdoor) air pollution*. 2024.
 162. Balluz, Lina Wen, Xiao-Jun Town, Machell Shire, Jeffrey D Qualter, Judy Mokdad, Ali, *Ischemic heart disease and ambient air pollution of particulate matter 2.5 in 51 counties in the US*. Public health reports, 2007. 122(5): p. 626-633.
 163. Bui Long Ta Nguyen, Phong Hoang, *Assessing impacts on rice production and quantifying economic cost losses with PM_{2.5}-based damage—A case of the Long Xuyen Quadrangle, Vietnam Mekong Delta*. Computers Electronics in Agriculture, 2024. 217: p. 108570.
 164. Change, Global Environmental, *Air Pollution and Productivity Loss: Global Trends*. 2021. 3(3): p. 256-275.

165. Deng, WJ Louie, PKK Liu, WK Bi, XH Fu, JM Wong, Ming Hung, *Atmospheric levels and cytotoxicity of PAHs and heavy metals in TSP and PM_{2.5} at an electronic waste recycling site in southeast China*. *Atmospheric Environment*, 2006. 40(36): p. 6945-6955.
166. Fang, Guor-Cheng Wu, Yuh-Shen Huang, Shih-Han Rau, Jui-Yeh, *Review of atmospheric metallic elements in Asia during 2000–2004*. *Atmospheric Environment*, 2005. 39(17): p. 3003-3013.
167. Gatari, Michael, Annemarie Wagner, and Johan Boman, *Elemental composition of tropospheric aerosols in Hanoi, Vietnam and Nairobi, Kenya*. *Science of The Total Environment*, 2005. 341(1): p. 241-249.
168. Giorio, Chiara Tapparo, Andrea Dall'Osto, Manuel Harrison, Roy M Beddows, David CS Di Marco, Chiara Nemitz, Eiko, *Comparison of three techniques for analysis of data from an Aerosol Time-of-Flight Mass Spectrometer*. *Atmospheric Environment*, 2012. 61: p. 316-326.
169. Group, World Bank, *Climate and Development: An Agenda for Action-Emerging Insights from World Bank Group 2021-22 Country Climate and Development Reports*. 2022.
170. Gustafsson, Örjan Ramanathan, Veerabhadran, *Convergence on climate warming by black carbon aerosols*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016. 113(16): p. 4243-4245.
171. Hien, To Thi, Chi, Nguyen Doan Thien Huy, Duong Huu Le, Hoang Anh Oram, David E Forster, Grant L Mills, Graham P Baker, Alex R *Soluble trace metals associated with atmospheric fine particulate matter in the two most populous cities in Vietnam*. *Atmospheric Environment: X*, 2022. 15: p. 100178.
172. Hodan, William M Barnard, William R, *Evaluating the contribution of PM_{2.5} precursor gases and re-entrained road emissions to mobile source PM_{2.5} particulate matter emissions*. Mactec Federal Programs, Research Triangle Park, NC, 2004.

173. Hu, Guoyuan Zhang, Yangmei Sun, Junying Zhang, Leiming Shen, Xiaojing Lin, Weili Yang, Yun, *Variability, formation and acidity of water-soluble ions in PM_{2.5} in Beijing based on the semi-continuous observations*. Atmospheric Research, 2014. 145: p. 1-11.
174. Huong Giang, Nguyen Tran and Nguyen Thi Kim Oanh, *Roadside levels and traffic emission rates of PM_{2.5} and BTEX in Ho Chi Minh City, Vietnam*. Atmospheric Environment, 2014. 94: p. 806-816.
175. Huy Duong Huu, Hien To Thi, Takenaka Norimichi, *Comparative study on water-soluble inorganic ions in PM_{2.5} from two distinct climate regions and air quality*. Journal of Environmental Sciences, 2020. 88: p. 349-360.
176. Huy, Duong Huu, To Thi Hien, and Norimichi Takenaka, *Influence of urban outflow on water-soluble ions in PM_{2.5} and > PM_{2.5} particles at a suburban Ho Chi Minh City site, Vietnam*. Atmospheric Research, 2022. 272: p. 106144.
177. Keighton, Walter B., *Aquatic chemistry: by W. Stumm and J. J. Morgan*. 583 pages, diagrams, 6 × 9 in. New York, John Wiley, 1970. Price, \$24.95. Journal of the Franklin Institute, 1973. 295(1): p. 86-87.
178. Lai, Alexandra M Carter, Ellison Shan, Ming Ni, Kun Clark, Sierra Ezzati, Majid Wiedinmyer, Christine Yang, Xudong Baumgartner, Jill Schauer, James J, *Chemical composition and source apportionment of ambient, household, and personal exposures to PM_{2.5} in communities using biomass stoves in rural China*. Science of The Total Environment, 2019. 646: p. 309-319.
179. lịch, Tổng cục Du, *Báo cáo tác động của ô nhiễm không khí đến du lịch tại Việt Nam*. 2022.
180. McNeill, Jacob, Graydon Snider, Crystal L. Weagle, Brenna Walsh, Paul Bissonnette, Emily Stone, Ihab Abboud, Clement Akoshile, Nguyen Xuan Anh, Rajasekhar Balasubramanian, Jeffrey R. Brook, Craig Coburn, Aaron Cohen, Jinlu Dong, Graham Gagnon, Rebecca M. Garland, Kebin He, Brent N. Holben, Ralph Kahn, Jong Sung Kim, Nofel Lagrosas, Puji Lestari, Yang

- Liu, Farah Jeba, Khaled Shaifullah Joy, J. Vanderlei Martins, Amit Misra, Leslie K. Norford, Eduardo J. Quel, Abdus Salam, Bret Schichtel, S. N. Tripathi, Chien Wang, Qiang Zhang, Michael Brauer, Mark D. Gibson, Yinon Rudich, and Randall V. Martin, *Large global variations in measured airborne metal concentrations driven by anthropogenic sources*. Scientific Reports, 2020. 10(1): p. 21817.
181. McNeill, Jacob Snider, Graydon Weagle, Crystal L Walsh, Brenna Bissonnette, Paul Stone, Emily Abboud, Ihab Akoshile, Clement Anh, Nguyen Xuan Balasubramanian, Rajasekhar, *Large global variations in measured airborne metal concentrations driven by anthropogenic sources*. Scientific reports, 2020. 10(1): p. 21817.
 182. Mehmood, Tariq Tianle, Z Ahmad, I Li, X Shen, F Akram, W Dong. *Variations of PM_{2.5}, PM₁₀ mass concentration and health assessment in Islamabad, Pakistan*. in *IOP Conference Series. Earth and Environmental Science*. 2018. IOP Publishing.
 183. Meng, CC Wang, LT Zhang, FF Wei, Z Ma, SM Ma, X Yang, *Characteristics of concentrations and water-soluble inorganic ions in PM_{2.5} in Handan City, Hebei province, China*. Atmospheric Research, 2016. 171: p. 133-146.
 184. Ooki, Atsushi Uematsu, Mitsuo Miura, Kazuhiko Nakae, Sigeru, *Sources of sodium in atmospheric fine particles*. Atmospheric Environment, 2002. 36(27): p. 4367-4374.
 185. Pean, Union, *Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe*. Official Journal of the European Union, 2008.
 186. Rudnick, R. L. and S. Gao, *3.01 - Composition of the Continental Crust*, in *Treatise on Geochemistry*, H.D. Holland and K.K. Turekian, Editors. 2003, Pergamon: Oxford. p. 1-64.

187. Rudnick, Roberta L Fountain, David M, *Nature and composition of the continental crust: a lower crustal perspective*. Reviews of geophysics, 1995. 33(3): p. 267-309.
188. Squizzato, S Masiol, M Brunelli, A Pistollato, S Tarabotti, E Rampazzo, G Pavoni, *Factors determining the formation of secondary inorganic aerosol: a case study in the Po Valley (Italy)*. Atmospheric chemistry physics, 2013. 13(4): p. 1927-1939.
189. Thao LTT and Hung NTQ, *Building research and adjustment zoning to receiving industrial emission in Dong Nai province*. J Agri Sci Technol (nong Lam University) 2016. 2: p. 66-76.
190. USAID, *Dioxin Remediation at Bien Hoa Airbase Area (Phase I: 2020 - 2025)*. Vietnam's Ministry of National Defense. Trigon Associates; Tetra Tech, 2020.
191. Wan, Man-Pun Wu, Chi-Li To, Gin-Nam Sze Chan, Tsz-Chun Chao, Christopher YH, *Ultrafine particles, and PM_{2.5} generated from cooking in homes*. Atmospheric environment, 2011. 45(34): p. 6141-6148.
192. WHO, *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*, W.H. Organization, Editor. 2021.
193. Xing, Yu-Fei Xu, Yue-Hua Shi, Min-Hua Lian, Yi-Xin, *The impact of PM_{2.5} on the human respiratory system*. Journal of thoracic disease, 2016. 8(1): p. E69.
194. Zhao, Yaxue Cheng, Zhiyuan Lu, Yongbin Chang, Xiaoyu Chan, Cynthia Bai, Yana Zhang, Yawei Cheng, Ning, *PM₁₀ and PM_{2.5} particles as main air pollutants contributing to rising risks of coronary heart disease: a systematic review*. Environmental Technology Reviews, 2017. 6(1): p. 174-185.

Phụ Lục

Phụ Lục 1: Hình ảnh quan trắc hiện trường



Hình PL1.1. Hình ảnh vị trí quan trắc tại Phường Long Bình

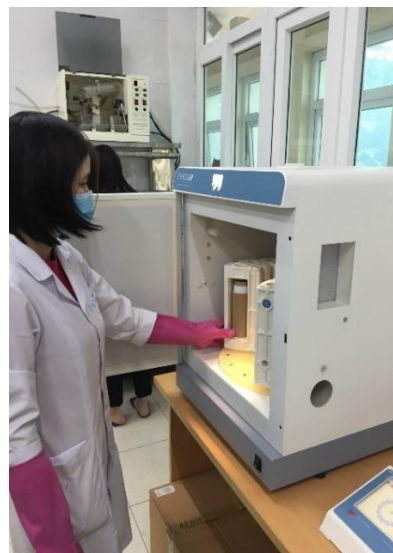
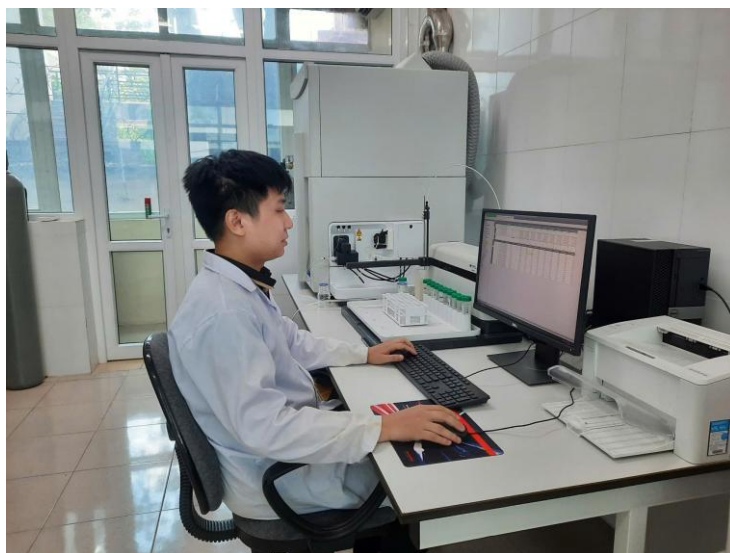


Hình PL1.2. Hình ảnh vị trí quan trắc Tại Cổng 2 Sân Bay



Hình PL1.3. Hình ảnh chụp mẫu ngoài hiện trường

Phụ Lục 2: Hình ảnh phân tích trong phòng thí nghiệm



Phục lục 3: Bảng kết quả phân tích

	Al	Cu	Ni	Co	Mn	Cr	As	Zn	Pb	Cd	Fe	NH ₄ ⁺	CL ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	K ⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	PM _{2.5}
	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³
SB22 K1	0,5413	0,2192	0,0216	0,0002	0,0242	0,1648	0,0056	0,5780	0,0552	0,0088	0,1298	4,126	2,718	6,384	5,390	1,120	2,960	5,650	1,890	57,4
SB22 K2	0,7592	0,1244	0,0210	0,0001	0,0372	0,3246	0,0003	0,6229	0,0528	0,0020	0,5019	5,168	3,584	5,486	4,320	0,384	3,660	3,750	0,988	35,8
SB22 K3	0,4128	0,5522	0,0105	0,0005	0,0223	0,1771	0,0002	0,7912	0,0072	0,0012	0,2220	4,046	4,029	6,684	6,840	2,880	4,170	8,955	1,130	98,7
SB22 K4	0,4707	0,3055	0,0185	0,0003	0,0279	0,2473	0,0082	0,5514	0,1000	0,0090	0,3213	5,358	4,361	6,217	8,779	1,390	5,760	8,064	1,220	85,2
SB22 K5	0,5545	0,5459	0,0357	0,0028	0,0427	0,4015	0,0054	0,7075	0,0617	0,0060	0,4411	7,895	5,959	8,777	6,020	0,390	3,070	10,91 2	0,380	70,6
SB22 K6	0,6619	0,5517	0,3158	0,0013	0,0520	0,4854	0,0066	0,7252	0,0686	0,3016	0,4870	6,350	3,189	8,020	8,774	3,470	2,970	7,822	0,720	77,7
SB22 K7	0,8196	0,5022	0,0545	0,0005	0,0626	0,6023	0,0045	0,7515	0,0704	0,0054	0,6909	3,024	2,232	7,143	5,074	0,632	1,770	11,28 0	0,889	63,7
SB22 K8	0,4793	0,4679	0,0216	0,0012	0,0310	0,2753	0,0046	0,6833	0,0563	0,0054	0,3281	5,766	4,783	7,226	6,220	3,360	3,670	9,310	0,946	56,4
SB22 K9	0,5301	0,2112	0,0239	0,0002	0,0301	0,2598	0,0029	0,4970	0,1327	0,0046	0,3072	3,195	2,197	4,923	6,855	0,966	2,640	6,771	0,493	44,2
SB22 K10	0,7069	0,2816	0,0318	0,0002	0,0402	0,3464	0,0039	0,6626	0,1769	0,0061	0,4096	5,235	3,879	7,413	7,780	0,899	2,910	7,894	0,652	62,3

Mùa khô	Al $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Cu $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Ni $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Co $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Mn $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Cr $\mu\text{g}/\text{m}^3$	As $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Zn $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Pb $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Cd $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Fe $\mu\text{g}/\text{m}^3$	NH_4^+ $\mu\text{g}/\text{m}^3$	CL^- $\mu\text{g}/\text{m}^3$	NO_3^- $\mu\text{g}/\text{m}^3$	SO_4^{2-} $\mu\text{g}/\text{m}^3$	K^+ $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Ca^{2+} $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Na^+ $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Mg^{2+} $\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\text{PM}_{2.5}$ $\mu\text{g}/\text{m}^3$
LB22 K1	0,335	0,078	0,090	0,000	0,027	0,285	0,001	0,305	0,057	0,001	0,143	6,510	3,017	5,160	7,020	2,140	1,280	6,1100	1,910	59,8
LB22 K2	0,683	0,480	0,001	0,001	0,033	0,142	0,000	0,886	0,036	0,001	0,458	5,021	1,120	4,270	5,650	0,949	2,570	7,3160	0,329	40,7
LB22 K3	0,388	0,107	0,009	0,001	0,016	0,016	0,020	0,813	0,049	0,004	0,229	7,860	4,258	7,681	$10,05_7$	2,930	3,430	12,3880	0,896	95,6
LB22 K4	0,469	0,222	0,034	0,001	0,025	0,147	0,007	0,668	0,047	0,002	0,276	6,810	3,467	6,702	9,240	3,970	5,730	10,940	0,478	115,2
LB22 K5	0,607	0,445	0,029	0,003	0,041	0,303	0,009	0,816	0,053	0,004	0,479	6,790	2,711	7,560	8,480	0,878	4,540	9,068	1,820	91,3
LB22 K6	0,552	0,404	0,233	0,004	0,041	0,326	0,032	0,763	0,056	0,005	0,456	7,750	2,543	6,360	8,730	0,991	3,510	9,352	1,430	88,6
LB22 K7	0,789	0,579	0,037	0,004	0,054	0,393	0,012	1,061	0,069	0,006	0,622	7,230	3,654	6,509	9,448	1,560	3,730	9,842	0,794	91,2
LB22 K8	0,595	0,377	0,025	0,003	0,037	0,237	0,014	0,897	0,057	0,005	0,443	5,632	3,541	4,250	7,660	0,560	4,530	10,433	0,871	61,2
LB22 K9	0,794	0,713	0,063	0,006	0,070	0,641	0,009	0,898	0,076	0,051	0,729	5,790	4,692	5,387	6,107	0,779	1,760	9,434	0,702	53,4
LB22 K10	0,585	0,409	0,095	0,003	0,040	0,289	0,018	0,825	0,056	0,005	0,459	8,730	2,932	8,040	6,961	1,560	5,530	9,618	0,708	102,2

Mù mura	Al	Cu	Ni	Co	Mn	Cr	As	Zn	Pb	Cd	Fe	NH ₄ ⁺	CL ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	K ⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	PM _{2.5}
	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³
SB21 M1	0,603	0,229	0,012	0,0006	0,026	0,109	0,0010	0,475	0,035	0,0010	0,496	4,16	0,97	4,13	4,09	1,56	3,61	2,82	0,40	32,00
SB21 M2	0,436	0,158	0,013	0,0004	0,028	0,094	0,0009	0,447	0,032	0,0015	0,463	3,86	2,38	3,12	2,10	0,79	2,09	2,64	0,22	26,67
SB21 M3	0,192	0,192	0,006	0,0004	0,027	0,064	0,0013	0,641	0,060	0,0008	0,285	3,07	1,99	3,86	2,52	1,10	1,15	1,15	0,61	21,52
SB21 M4	0,279	0,064	0,008	0,0005	0,028	0,050	0,0011	0,550	0,047	0,0007	0,249	1,55	1,60	3,33	2,13	1,25	0,94	2,09	0,49	19,09
SB21 M5	0,699	0,061	0,017	0,0008	0,032	0,064	0,0015	0,455	0,041	0,0011	0,320	1,35	1,04	1,25	3,78	0,90	1,60	3,11	0,12	21,06
SB21 M6	0,554	0,110	0,046	0,0002	0,024	0,049	0,0009	0,279	0,048	0,0006	0,501	1,31	1,55	1,84	2,83	0,54	1,66	3,84	0,39	18,40
SB21 M7	0,488	0,141	0,005	0,0003	0,030	0,028	0,0012	0,628	0,052	0,0012	0,344	3,47	2,00	4,53	5,37	1,03	4,85	6,42	0,51	47,60
SB21 M8	0,194	0,023	0,001	0,0002	0,008	0,125	0,0003	0,060	0,004	0,0003	0,660	4,15	3,79	3,87	3,57	3,38	2,56	6,03	0,47	50,40
SB21 M9	0,255	0,017	0,002	0,0001	0,030	0,027	0,0008	0,359	0,044	0,0015	0,254	3,75	2,07	3,33	4,77	1,74	1,74	3,14	0,34	30,40
SB21 M10	0,830	0,105	0,001	0,0001	0,016	0,084	0,0007	0,059	0,013	0,0004	0,388	1,15	1,40	1,12	1,37	0,30	1,47	2,55	0,24	15,20

Mùa mưa	Al <i>μg/m³</i>	Cu <i>μg/m³</i>	Ni <i>μg/m³</i>	Co <i>μg/m³</i>	Mn <i>μg/m³</i>	Cr <i>μg/m³</i>	As <i>μg/m³</i>	Zn <i>μg/m³</i>	Pb <i>μg/m³</i>	Cd <i>μg/m³</i>	Fe <i>μg/m³</i>	NH₄⁺ <i>μg/m³</i>	CL⁻ <i>μg/m³</i>	NO₃⁻ <i>μg/m³</i>	SO₄²⁻ <i>μg/m³</i>	K⁺ <i>μg/m³</i>	Ca²⁺ <i>μg/m³</i>	Na⁺ <i>μg/m³</i>	Mg²⁺ <i>μg/m³</i>	PM_{2.5} <i>μg/m³</i>
LB21 M1	0,441	0,066	0,024	0,0006	0,030	0,118	0,0009	0,359	0,027	0,0009	0,627	3,580	1,576	4,125	6,534	3,980	5,927	2,652	0,411	47,2
LB21 M2	0,499	0,105	0,022	0,0007	0,040	0,069	0,0010	0,347	0,015	0,0009	0,370	0,696	1,021	0,914	3,760	1,808	1,850	2,390	0,174	21,6
LB21 M3	0,433	0,049	0,018	0,0006	0,031	0,057	0,0014	0,532	0,050	0,0015	0,332	2,490	1,019	2,910	2,420	0,898	3,620	2,490	0,124	26,35
LB21 M4	0,344	0,035	0,008	0,0010	0,032	0,035	0,0008	0,682	0,049	0,0007	0,038	8,570	5,700	8,089	7,660	4,049	5,020	7,220	1,155	101,59
LB21 M5	0,317	0,253	0,008	0,0006	0,029	0,042	0,0014	0,422	0,051	0,0015	0,123	1,120	1,598	2,120	5,292	1,530	4,313	1,818	0,475	32
LB21 M6	0,289	0,470	0,004	0,0002	0,019	0,039	0,0009	0,367	0,107	0,0018	0,245	3,740	1,914	3,645	2,360	3,642	1,070	2,752	0,312	30,8
LB21 M7	0,295	0,123	0,004	0,0003	0,040	0,034	0,0011	0,664	0,068	0,0015	0,318	5,150	2,823	6,911	4,930	0,630	3,830	4,170	0,769	55,4
LB21 M8	0,413	0,040	0,005	0,0002	0,034	0,036	0,0011	0,218	0,027	0,0008	0,423	1,780	1,984	4,070	4,450	1,840	3,510	2,722	0,388	33,6
LB21 M9	0,242	0,014	0,001	0,0001	0,020	0,028	0,0007	0,262	0,015	0,0008	0,109	3,460	3,470	4,261	3,667	0,940	3,998	1,508	0,328	31,2
LB21 M10	0,021	0,040	0,043	0,0001	0,004	0,001	0,0004	0,283	0,012	0,0003	0,097	0,945	1,075	1,935	2,417	0,650	2,760	2,030	0,111	28,8

Phục lục 4: Bảng kết quả QA/QC

	Al	Cu	Ni	Co	Mn	Cr	As	Zn	Pb	Cd	Fe	NH ₄ ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	K ⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	Mg ²⁺
Mẫu Blank																			
Mùa Khô	0,0232	0,0101	0,0082	0,0002	0,0141	0,018	0,0013	0,0248	0,0021	0,0006	0,0241	0,0143	0,0027	0,0154	0,054	0,0261	0,0301	0,0382	0,0027
Mùa mưa	0,0186	0,0081	0,0066	0,0001	0,0098	0,0165	0,0013	0,0211	0,0019	0,0005	0,0265	0,0119	0,0024	0,014	0,0508	0,0209	0,0265	0,0328	0,0024
Mẫu thêm chuẩn																			
Mùa Khô	0,6126	0,2637	0,0623	0,0403	0,0721	0,212	0,4062	1,0128	0,0972	0,0482	0,5283	4,249	2,863	6,542	5,461	1,255	7,021	5,762	1,978
Mùa mưa	0,3475	0,3	0,0485	0,0406	0,0705	0,0805	0,4015	0,806	0,0925	0,0414	0,529	1,186	1,7205	2,1925	5,632	1,656	8,1035	1,7725	0,4995
Mẫu lặp																			
SB22k1-dup	0,502	0,198	0,021	0,0002	0,021	0,153	0,005	0,544	0,049	0,008	0,118	3,83	2,46	6,11	5,018	1,087	2,689	5,286	1,686
LB22K4-dup	0,444	0,229	0,032	0,001	0,028	0,141	0,0065	0,637	0,041	0,002	0,267	6,435	3,672	5,905	8,892	3,545	5,372	10,56	0,425
SB21M6-dup	0,483	0,127	0,045	0,0002	0,027	0,046	0,001	0,254	0,045	0,0007	0,469	1,453	1,625	1,668	2,672	0,493	1,785	3,459	0,452
LB21M5 -dup	0,298	0,267	0,009	0,0006	0,032	0,039	0,0016	0,39	0,054	0,0013	0,135	1,172	1,763	2,185	5,892	1,702	3,894	1,647	0,444

Phục lục 5: Bảng giá trị EF

Mùa mưa	Al	Cu	Ni	Co	Mn	Cr	As	Zn	Pb	Cd	Fe
SB21M1	1,00	519,86	20,12	3,36	3,74	145,90	74,38	925,71	341,50	938,73	1,20
SB21M2	1,00	495,77	28,37	3,39	5,65	173,67	98,47	1206,12	428,93	1906,89	1,55
SB21M3	1,00	1369,36	28,12	6,27	12,04	267,44	310,79	3920,13	1846,65	2290,92	2,17
SB21M4	1,00	316,63	29,35	5,37	8,82	143,85	186,16	2318,89	997,14	1413,76	1,31
SB21M5	1,00	119,91	23,15	3,64	4,01	73,94	100,89	766,27	347,24	873,83	0,67
SB21M6	1,00	272,96	81,78	1,35	3,76	71,98	74,83	593,10	512,31	638,28	1,32
SB21M7	1,00	395,13	9,84	1,77	5,30	45,64	112,15	1512,49	628,21	1321,12	1,03
SB21M8	1,00	164,98	7,01	2,58	3,54	522,38	68,93	362,23	112,02	773,29	4,98
SB21M9	1,00	90,07	8,43	1,70	10,05	85,59	146,09	1653,29	1020,96	3138,87	1,45
SB21M10	1,00	172,70	0,74	0,28	1,66	81,27	37,02	83,54	94,80	251,17	0,68
LB21M1	1,00	205,73	52,62	4,82	5,89	215,52	97,49	956,24	363,58	1077,74	2,08
LB21M2	1,00	288,18	42,49	4,95	7,01	110,92	91,25	819,37	172,37	948,66	1,08
LB21M3	1,00	153,83	41,70	4,41	6,29	106,79	146,36	1443,76	680,37	1908,05	1,12
LB21M4	1,00	137,86	22,12	9,57	8,09	81,38	112,45	2333,02	838,53	1188,45	0,16
LB21M5	1,00	1095,25	25,74	6,45	8,02	106,66	201,67	1563,31	947,13	2554,81	0,57
LB21M6	1,00	2227,12	14,28	1,96	5,70	107,77	142,46	1489,87	2167,16	3496,76	1,24
LB21M7	1,00	570,34	14,13	2,88	11,61	91,87	168,07	2644,53	1356,60	2769,73	1,57
LB21M8	1,00	131,69	11,57	1,89	7,16	70,07	119,97	619,61	378,87	1095,35	1,50

LB21M9	1,00	82,11	3,87	1,99	7,11	93,95	139,46	1272,26	369,67	1791,44	0,66
LB21M10	1,00	2542,51	1954,11	15,43	15,53	18,91	810,00	15578,4	3169,48	8382,89	6,62

Mùa khô	Al	Cu	Ni	Co	Mn	Cr	As	Zn	Pb	Cd	Fe
SB22K1	1,00	555,48	39,10	0,97	3,87	245,66	473,04	1255,47	119,90	8920,09	0,35
SB22K2	1,00	224,84	27,15	0,40	4,25	345,04	16,62	964,69	81,85	1416,55	0,97
SB22K3	1,00	1834,72	24,97	3,70	4,68	346,19	23,04	2253,27	20,44	1541,74	0,79
SB22K4	1,00	890,45	38,55	1,86	5,13	423,87	792,83	1377,30	249,82	10538,30	1,00
SB22K5	1,00	1350,43	63,04	16,88	6,67	584,18	444,43	1500,16	130,89	5936,97	1,16
SB22K6	1,00	1143,26	467,38	6,45	6,80	591,71	457,96	1288,05	121,92	249995,3	1,08
SB22K7	1,00	840,53	65,18	1,95	6,62	592,97	253,16	1077,98	101,03	3601,63	1,23
SB22K8	1,00	1338,90	44,10	8,18	5,60	463,39	437,49	1676,15	138,11	6181,23	1,00
SB22K9	1,00	546,48	44,13	1,12	4,92	395,43	252,29	1102,13	294,25	4712,39	0,85
SB22K10	1,00	546,48	44,13	1,12	4,92	395,43	252,29	1102,13	294,25	4712,39	0,85
SB22K11	1,00	1505,80	60,96	9,05	6,61	572,32	317,89	1642,88	93,11	18117,83	1,13
LB22K1	1,00	321,13	264,48	1,42	7,00	686,20	141,99	1071,51	994,27	2097,15	0,62
LB22K2	1,00	963,05	1,61	3,55	4,25	167,29	17,30	1524,47	307,87	1124,69	0,98
LB22K3	1,00	377,60	23,96	7,66	3,48	33,33	2307,82	2460,33	747,37	5629,21	0,86
LB22K4	1,00	648,50	70,39	4,18	4,69	253,87	679,52	1675,03	592,70	2600,20	0,86
LB22K5	1,00	1006,50	46,06	16,52	5,90	402,10	686,81	1580,39	516,87	3881,33	1,15
LB22K6	1,00	1004,56	413,14	20,98	6,44	476,97	2616,14	1625,46	599,24	4931,37	1,21
LB22K7	1,00	1006,50	46,06	16,52	5,90	402,10	686,81	1580,39	516,87	3881,33	1,15

LB22K8	1,00	869,66	41,25	14,59	5,38	321,86	1039,52	1771,85	567,02	4261,64	1,09
LB22K9	1,00	1231,98	78,12	26,65	7,61	652,03	545,05	1330,51	560,70	35363,75	1,34
LB22K10	1,00	959,47	159,92	17,27	5,89	398,44	1413,49	1659,51	559,80	4340,71	1,15
LB22K11	1,00	1226,03	119,86	27,39	18,99	662,56	1391,97	1346,65	577,94	37015,09	1,35