



ระดับความเข้มข้นและองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่น $PM_{2.5}$ ในพื้นที่เมืองนครราชสีมา

CONCENTRATION AND CHEMICAL COMPOSITION OF $PM_{2.5}$

IN NAKHON RATCHASIMA CITY

ภักว์วัฒน์ ทองแสง¹ สูดจิต กรุจิต² และ ประพัทธ์ พงษ์เกียรติกุล³

¹นักศึกษา, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

³ผู้ช่วยศาสตราจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาฝุ่น $PM_{2.5}$ และองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ Black Carbon สารไอออนิก และธาตุในพื้นที่เมืองและพื้นที่อุตสาหกรรมของเมืองนครราชสีมา ทำการเก็บตัวอย่างพื้นที่ละ 1 จุด จุดละ 41 ตัวอย่าง ในระยะเวลา 4 เดือนต่อเนื่อง (พ.ย. 59 – ก.พ. 60) ผลการศึกษาพบว่าระดับความเข้มข้น $PM_{2.5}$ เฉลี่ย 24 ชั่วโมง ในพื้นที่อุตสาหกรรมสูงกว่าพื้นที่เมืองอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ในทางตรงกันข้าม ความเข้มข้นของ Black Carbon ในพื้นที่เมืองสูงกว่าพื้นที่อุตสาหกรรม ส่วนผลการวิเคราะห์ของสารไอออนิก 7 ชนิด และธาตุ 20 ชนิด พบว่าค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของสารไอออนิก 3 ชนิด ได้แก่ Cl^- , NO_3^- และ K^+ และความเข้มข้นของธาตุ 9 ชนิด ได้แก่ Ag , Al , Cd , Fe , Mn , Ni , Tl , V และ Zn ในพื้นที่อุตสาหกรรมสูงกว่าพื้นที่เมือง นอกจากนี้สัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นที่ตรวจวัดได้ในพื้นที่เมืองมีส่วนเรียงจากมากไปน้อย ได้แก่ แอนไอออน แคลไอออน Black Carbon และธาตุ ตามลำดับ ส่วนพื้นที่อุตสาหกรรมมีส่วนเรียงจากมากไปน้อย ได้แก่ แอนไอออน แคลไอออน ธาตุ และ Black Carbon ตามลำดับ ผลการศึกษานี้ของเมืองนครราชสีมาในการศึกษานี้มีความใกล้เคียงกับผลที่ได้จากเมืองอื่นและสามารถนำไปใช้วิเคราะห์ในแบบจำลองเพื่อทำนายแหล่งกำเนิดมลสารในอนาคต

คำสำคัญ: มลพิษอากาศ, ฝุ่น, $PM_{2.5}$, องค์ประกอบทางเคมี, นครราชสีมา

ABSTRACT

This research investigated the $PM_{2.5}$ concentrations and chemical compositions – black carbon, ionic species, and elements – in urban and industrial areas of Nakhon Ratchasima city. For each area, 41 samples were collected consecutively from its sampling location for 4 months (Nov. 2016 – Feb. 2017). Results show that the mean value of the 24-hr average $PM_{2.5}$ concentration in the industrial area was significantly higher than the urban area, with a 95% confidence level. In contrast, the mean value of black

Phakkawat Thongsaeng¹ Sudjit Karuchit² and Prapat Pongkiatkul³

¹Student, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

²Assistant Professor, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

³Assistant Professor, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi

carbon concentration in the urban area was higher. Analyses of 7 ionic species and 20 elements revealed that the mean values of 3 ionic species – Cl^- , NO_3^- , and K^+ – and 9 elements – Ag, Al, Cd, Fe, Mn, Ni, Tl, V, and Zn – were higher in the industrial area. In addition, the proportions of the chemical composition of dust in decreasing order were anions, cations, black carbon, and elements for the urban area; and anions, cations, elements, and black carbon for the industrial area. Results of Nakhon Ratchasima city study are comparable to those of other cities and useful for future modeling analysis to identify air pollution sources.

KEYWORD: air pollution, dust, $\text{PM}_{2.5}$, chemical composition, Nakhon Ratchasima

1. บทนำ

ปัญหาหมอกพิษอากาศของเมืองในภูมิภาคเอเชียเกิดจากการที่เมืองมีการพัฒนาและขยายตัวอย่างรวดเร็วและมีแหล่งกำเนิดมลพิษสำคัญ ๆ เพิ่มมากขึ้น [1] ทั้งนี้ รายงานสถานการณ์คุณภาพอากาศและเสี่ยงประเทศไทยในปี พ.ศ.2559 [2] โดยกรมควบคุมมลพิษระบุว่าจากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศแบบถาวรทั่วประเทศทั้งหมด 19 แห่ง มี 11 แห่งที่มีความเข้มข้นเฉลี่ยของฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน ($\text{PM}_{2.5}$) เกินค่ามาตรฐานในบรรยากาศทั่วไปในเวลา 1 ปี ตามมาตรฐานของประเทศไทย (ไม่เกิน 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) และทั้งหมด 19 แห่งมีความเข้มข้นเฉลี่ยของ $\text{PM}_{2.5}$ เกินค่ามาตรฐานในบรรยากาศทั่วไปในเวลา 1 ปี ตามมาตรฐานขององค์การอนามัยโลก (ไม่เกิน 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) ซึ่งแสดงถึงปัญหาระดับความเข้มข้นของฝุ่นขนาดเล็กที่สูงในเมืองใหญ่หลายแห่งของประเทศ

นอกจากระดับความเข้มข้นของฝุ่นละอองแล้ว องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่น ได้แก่ ไอออนและธาตุต่าง ๆ รวมทั้งคาร์บอนในรูปแบบของ Black Carbon และ Organic Carbon ก็มีความสำคัญในด้านผลกระทบเช่นกัน สืบเนื่องจากการที่ $\text{PM}_{2.5}$ สามารถล่องลอยอยู่ในบรรยากาศได้นานและสะสมสารมลพิษอื่น ๆ ในอากาศ การได้รับสัมผัส $\text{PM}_{2.5}$ ผ่านทางจมูกหรือปากสามารถนำสารเหล่านี้เข้าสู่ระบบทางเดินหายใจ ถุงลมปอด และผ่านเข้าสู่กระแสเลือดไปยังอวัยวะต่าง ๆ ได้ ซึ่งเป็นการเพิ่มความเสี่ยงต่อการเป็นโรคเรื้อรัง โดยเฉพาะหากได้รับสัมผัสอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน

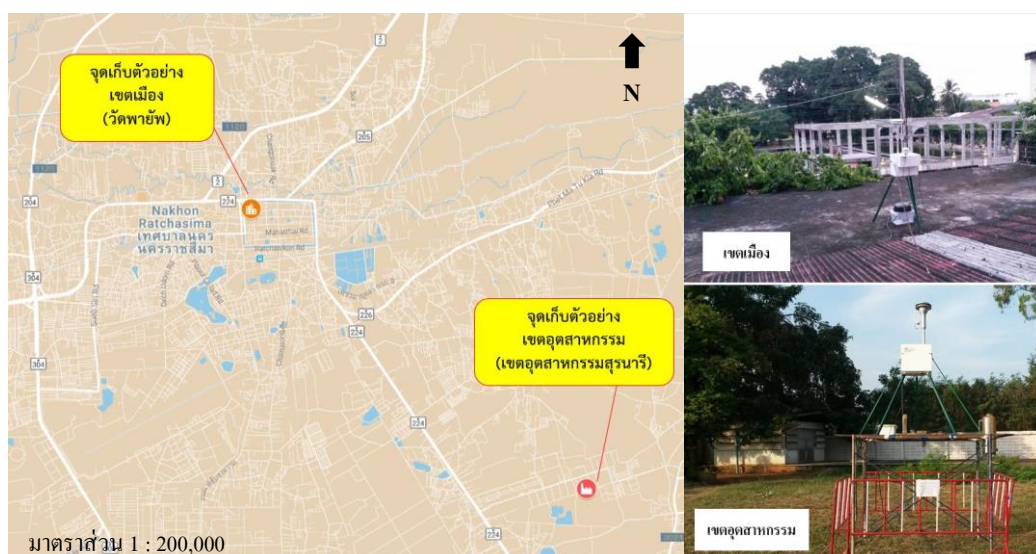
งานวิจัยนี้มีเป้าหมายในการศึกษาระดับความเข้มข้นและองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่น $\text{PM}_{2.5}$ ในเขตเมือง โดยเลือกเมืองนครราชสีมาซึ่งมีขนาดใหญ่เป็นอันดับสองของประเทศเป็นพื้นที่ศึกษา และแบ่งประเภทของพื้นที่ตามลักษณะการใช้ประโยชน์หลักออกเป็น 2 พื้นที่ คือ พื้นที่เมืองและพื้นที่อุตสาหกรรม เพื่อให้ทราบถึงข้อมูลของแต่ละพื้นที่และทำการเปรียบเทียบความแตกต่าง นอกจากนั้นยังนำผลการศึกษาที่ได้ไปอภิปรายเปรียบเทียบกับงานวิจัยใกล้เคียงที่ทำการศึกษาในเมืองใหญ่อื่น ๆ โดยผลการศึกษานี้ช่วยให้เกิดความเข้าใจถึงสถานการณ์ของปัญหาและเป็นประโยชน์ต่อการคาดการณ์แหล่งกำเนิดฝุ่นละอองที่สำคัญในแต่ละพื้นที่ อันจะนำไปสู่การป้องกันแก้ไขเพื่อลดผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชน

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 พื้นที่ศึกษาและการเก็บตัวอย่าง

พื้นที่ศึกษาคือพื้นที่เมืองนครราชสีมา โดยแบ่งออกเป็นพื้นที่การใช้ประโยชน์ 2 ลักษณะ ได้แก่ 1) พื้นที่เมือง คือบริเวณใจกลางเมืองนครราชสีมาที่มีประชากรหนาแน่น ประกอบด้วยบ้านเรือนชุมชน อาคารพาณิชย์กรรม ห้างสรรพสินค้า สถานศึกษาและสถานที่ราชการ เป็นต้น และ 2) พื้นที่อุตสาหกรรม คือบริเวณเขตอุตสาหกรรมสุรนารี ซึ่งมีโรงงานอุตสาหกรรมประเภทผลิต

ชั้นส่วนอะไหล่รถยนต์ จักรยานยนต์ และอิเล็กทรอนิกส์เป็นหลัก รวมจำนวน 26 โรงงาน ภายในพื้นที่ทั้งหมด 1,675 ไร่ โดยระยะห่างระหว่าง 2 จุด ประมาณ 10 กิโลเมตร (รูปที่ 1) จุดเก็บตัวอย่างพื้นที่เมือง คือ วัดพาศัย บนหลังคาชั้น 2 สูงจากพื้นดินประมาณ 5 เมตร ส่วนจุดเก็บตัวอย่างพื้นที่พื้นที่อุตสาหกรรม คือ หอฟักเอกชนในเขตอุตสาหกรรมสุรนารี โดยใช้ชั้นนั่งร้านตั้งเครื่องมือ มีความสูงจากพื้นดิน ประมาณ 4 เมตร การเก็บตัวอย่างฝุ่น $PM_{2.5}$ ทำตามวิธี Quality Assurance Guidance Document 2.12 [3] โดยใช้เครื่อง PQ200 Particulate Sampler และกระดาศกรองควอตซ์ขนาด 47 mm ซึ่งนำเครื่องมือไปตั้งไว้จุดละ 1 เครื่อง เพื่อทำการเก็บตัวอย่างพร้อมกัน การเก็บตัวอย่างเป็นแบบต่อเนื่อง 24 ชั่วโมง ต่อ 1 ตัวอย่าง ที่อัตราการไหล $16.7 \text{ m}^3/\text{min}$ ดำเนินการในเดือนพฤศจิกายน 2559 – กุมภาพันธ์ 2560 ซึ่งครอบคลุมฤดูหนาว โดยตั้งเครื่องมือเป็นช่วง ช่วงละประมาณ 7 วันต่อเนื่อง รวมตลอดระยะเวลาสามารถเก็บตัวอย่างได้ทั้งสิ้น 41 ตัวอย่างต่อจุด นำตัวอย่างที่ได้มาคำนวณหาความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ โดยการหามวลฝุ่นละอองที่ติดอยู่บนกระดาศกรอง หลังจากนั้นนำกระดาศกรองมาตัดแบ่งเป็น 4 ส่วน เท่า ๆ กัน แล้วนำไปเก็บรักษาไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีต่อไป



รูปที่ 1 พื้นที่ศึกษาและจุดเก็บตัวอย่าง 2 พื้นที่

2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

กระดาศกรองที่ถูกแบ่งส่วนที่ 1 ถูกนำมาวิเคราะห์หาสารไอออนิก โดยเลือกวิเคราะห์หาแคทไอออน ได้แก่ Ca^{2+} K^+ Na^+ และ NH_4^+ และแอนไอออน ได้แก่ Cl^- NO_3^- และ SO_4^{2-} และใช้เครื่อง Dionex ICS-5000 ในการวิเคราะห์ ซึ่งความเข้มข้นของสารไอออนิกสามารถคำนวณได้ดังนี้ [4]

$$\text{ปริมาณไอออน } (\mu\text{g/filter}) = \frac{\text{ppm} \times V_e \times D}{F} \quad (1)$$

โดยที่ ppm คือ ความเข้มข้นของไอออนที่อ่านได้จากเครื่อง ICS5000
 V_e คือ ปริมาณที่ใช้สกัด (ml)

D คือ จำนวนเท่าของการเจือจาง
F คือ สัดส่วนพื้นที่ของกระดาษที่นำมาวิเคราะห์
นำค่าที่ได้จากสมการที่ 1 มาแทนในสมการที่ 2 จะได้ผลการตรวจวัดสารไอออนิก

$$\text{ความเข้มข้นของไอออน } (\mu\text{g}/\text{m}^3) = \frac{\text{ปริมาณไอออน } (\mu\text{g}/\text{filter})}{v_{std}} \quad (2)$$

โดยที่ v_{std} คือ ปริมาตรอากาศทั้งหมด (m^3) ที่สภาวะมาตรฐาน (อุณหภูมิ 298 K ความดัน 760 mmHg)

กระดาษกรองที่ถูกแบ่งส่วนที่ 2 ถูกนำมาวิเคราะห์ธาตุทั้งหมด 20 ชนิด ได้แก่ Ag Al As Ba Cd Co Cr Cu Fe Mg Mn Ni Pb Sb Se Sr Ti Tl V และ Zn โดยใช้เครื่อง Agilent 7700 Series ICP-MS ซึ่งการคำนวณความเข้มข้นของธาตุสามารถคำนวณได้ดังนี้ [5]

$$\text{ปริมาณธาตุ } (\text{ng}/\text{filter}) = \frac{\mu\text{g}/l \times Ve \times D}{F} \quad (3)$$

โดยที่ $\mu\text{g}/l$ คือ ความเข้มข้นของไอออนที่อ่านได้จากเครื่อง ICP-MS
นำค่าที่ได้จากสมการที่ 3 มาแทนในสมการที่ 4 จะได้ผลการตรวจวัดปริมาณธาตุ

$$\text{ความเข้มข้นของธาตุ } (\text{ng}/\text{m}^3) = \frac{\text{ปริมาณธาตุ } (\text{ng}/\text{filter})}{v_{std}} \quad (4)$$

กระดาษกรองที่ถูกแบ่งส่วนที่ 3 ถูกนำมาวิเคราะห์ Black Carbon (BC) โดยใช้เครื่องมือ EEL 043 Smoke Stain Reflectometer ซึ่งในตรวจวัดจะทำการสอบเทียบเครื่องมือก่อน หลังจากนั้นจึงทำการตรวจวัด 3 ซ้ำ โดยผลการตรวจวัดที่ได้จะนำมาแทนค่าในสมการที่ 5 [6]

$$\text{BC } (\mu\text{g}/\text{cm}^2) = 4.58(-\ln[\text{reading}]) + 20.19 \quad (5)$$

โดย reading คือ ค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือ
นำค่าที่ได้จากสมการที่ 5 มาแทนในสมการที่ 6 จะได้ผลการตรวจวัดปริมาณ BC

$$\text{ความเข้มข้นของ Black carbon } (\mu\text{g}/\text{m}^3) = \frac{\text{BC } (\mu\text{g}/\text{cm}^2) \times A}{v_{std}} \quad (6)$$

โดยที่ A คือ พื้นที่ของฝุ่นละอองที่ติดบนกระดาษกรอง (cm^2)

3. ผลการศึกษาและวิจารณ์

3.1 ระดับความเข้มข้นและองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่น PM_{2.5}

จากการวิเคราะห์ตัวอย่างทั้งหมด สรุปผลการวิเคราะห์สถิติพรรณนาของความเข้มข้นของ PM_{2.5} Black Carbon และสารไอออนิกในองค์ประกอบของ PM_{2.5} ได้ดังตารางที่ 1 และผลการวิเคราะห์สถิติพรรณนาของความเข้มข้นธาตุในองค์ประกอบของ PM_{2.5} ได้ดังตารางที่ 2 โดยทั้งสองตารางแสดงผลแยกตามพื้นที่ 2 ประเภทที่ศึกษา พบว่าค่าแนวโน้มส่วนกลางคือค่าเฉลี่ยและค่ามัธยฐานทุกพารามิเตอร์ค่อนข้างใกล้เคียงกัน แสดงว่าไม่มีอิทธิพลจากค่าที่สูงผิดปกติมากนัก ส่วนค่า COV (Coefficient of Variation) ส่วนใหญ่มีค่าไม่สูง แสดงถึงการกระจายข้อมูลไม่มาก แต่จากการสร้างและพิจารณา Histogram และ Box plot พบว่าส่วนใหญ่มีลักษณะเบ้ขวาและมีค่าที่อยู่นอกกลุ่ม (outliers) ในด้านมาก นอกจากนี้ ผลการพิจารณาค่า Skewness และ Kurtosis ของบางพารามิเตอร์ เช่น NO₃⁻ และ Ca²⁺ ในพื้นที่เมือง พบว่ามีค่าบวกและสูงกว่า 1 ค่อนข้างมาก แสดงลักษณะการแจกแจงแบบเบ้ขวาที่มีหางที่เรียวยาว ผลการทดสอบการแจกแจงแบบปกติด้วยวิธี Shapiro-Wilk พบว่าข้อมูลส่วนมากมีการแจกแจงไม่ปกติ ดังนั้นในการวิเคราะห์สถิติในขั้นถัดไปจึงทำการแปลงค่าของพารามิเตอร์ทั้งหมดโดยใช้ natural log เพื่อปรับให้การแจกแจงใกล้เคียงแบบปกติและสอดคล้องกับสมมติฐานของการทดสอบ

ตารางที่ 1 สถิติพรรณนาของความเข้มข้น PM_{2.5} Black Carbon และสารไอออนิกในองค์ประกอบของ PM_{2.5}

พารามิเตอร์	เขต	Mean	Median	SD	COV	Min.	Max.	Shapiro-Wilk Test p-value	Paired t-Test p-value
PM _{2.5}	เมือง	29.93	27.84	13.05	0.44	8.15	63.08	0.060	0.000**
	อุตสาหกรรม	34.71	30.95	14.03	0.40	14.58	66.07	0.002*	
BC	เมือง	0.65	0.68	0.21	0.32	0.30	1.13	0.055	0.000**
	อุตสาหกรรม	0.52	0.51	0.19	0.37	0.22	0.88	0.158	
Cl ⁻	เมือง	0.20	0.15	0.13	0.66	0.03	0.51	0.001*	0.000**
	อุตสาหกรรม	0.34	0.33	0.20	0.58	0.02	0.86	0.417	
NO ₃ ⁻	เมือง	1.18	1.00	0.99	0.84	0.32	6.40	0.000*	0.027**
	อุตสาหกรรม	1.20	1.11	0.58	0.49	0.50	2.81	0.001*	
SO ₄ ²⁻	เมือง	3.79	3.35	2.65	0.70	0.88	12.11	0.000*	0.189
	อุตสาหกรรม	4.01	3.40	2.75	0.69	1.02	13.05	0.000*	
Ca ²⁺	เมือง	0.98	0.89	0.48	0.48	0.53	3.20	0.000*	0.366
	อุตสาหกรรม	1.00	0.96	0.28	0.28	0.57	1.59	0.046*	
K ⁺	เมือง	0.63	0.50	0.45	0.71	0.05	1.55	0.001*	0.000**
	อุตสาหกรรม	0.76	0.69	0.45	0.60	0.08	1.60	0.008*	
Na ⁺	เมือง	1.38	1.30	0.38	0.28	0.85	3.02	0.000*	0.161
	อุตสาหกรรม	1.48	1.39	0.40	0.27	1.05	2.74	0.000*	
NH ₄ ⁺	เมือง	0.80	0.52	0.94	1.18	0.00	3.94	0.000*	0.857
	อุตสาหกรรม	0.93	0.75	1.00	1.08	0.00	4.23	0.000*	

*การแจกแจงไม่เป็นแบบปกติ; **ค่าเฉลี่ยของพื้นที่เมืองและพื้นที่อุตสาหกรรมแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ระดับความเข้มข้น PM_{2.5} เฉลี่ย 24 ชั่วโมง ในพื้นที่เมือง ผลการศึกษาพบค่าเฉลี่ยตัวอย่างทั้งหมดเท่ากับ 29.93 µg/m³ มีค่าเกินมาตรฐานอยู่ 3 วัน คือ วันที่ 10-11 ธันวาคม 2559 และวันที่ 29 มกราคม 2560 ส่วนพื้นที่อุตสาหกรรมมีค่าเฉลี่ยทั้งหมดเท่ากับ 34.71

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ มีค่าเกินมาตรฐานอยู่ 7 วัน คือ วันที่ 9-12 ธันวาคม 2559 วันที่ 29-30 มกราคม 2560 และวันที่ 4 กุมภาพันธ์ 2560 โดยค่ามาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศโดยทั่วไปของ $\text{PM}_{2.5}$ ของประเทศไทยกำหนดค่าเฉลี่ยในเวลา 24 ชั่วโมงไม่เกิน $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ทั้งนี้ ค่าที่เกินค่ามาตรฐานในวันเดียวกันของทั้ง 2 พื้นที่ คือ วันที่ 10-11 ธันวาคม 2559 และวันที่ 29 มกราคม 2560 ซึ่งอาจมีสาเหตุจากการจราจรที่หนาแน่นในช่วงวันหยุดต่อเนื่องและช่วงงานเทศกาลตรุษจีน

เมื่อทำการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างค่าที่วัดได้ในพื้นที่เมืองกับพื้นที่อุตสาหกรรมด้วยวิธี Paired t-Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 พบว่าพื้นที่อุตสาหกรรมสุรนารีมีค่ามากกว่าพื้นที่เมืองนครราชสีมาอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งสอดคล้องกับรายงานบัญชีการปล่อยมลพิษทางอากาศของเทศบาลนครราชสีมา ในปี 2553 [7] ที่พบว่าปริมาณการเกิดฝุ่นนั้นมาจากโรงงานอุตสาหกรรมมีมากที่สุด โดยในพื้นที่อุตสาหกรรมมีแหล่งกำเนิดฝุ่นจากกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมและการขนส่งสินค้าและผลิตภัณฑ์เป็นหลัก ส่วนในพื้นที่เมืองนครราชสีมา มีสาเหตุแหล่งกำเนิดฝุ่นจากการคมนาคมเป็นหลัก

ในกรณีของ Black Carbon จากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าในพื้นที่เมืองกลับมีค่าความเข้มข้นเฉลี่ยสูงกว่าพื้นที่อุตสาหกรรมอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้ สันนิษฐานว่าเนื่องจากในพื้นที่เมืองนครราชสีมา มีกิจกรรมเกี่ยวกับการเผาไหม้ที่เป็นสาเหตุของการเกิด Black Carbon หลายกิจกรรม อาทิ การเผาเศษวัชพืชและต้นไม้ การเผาเชื้อเพลิงแข็ง (ถ่าน ไม้ฟืน) และการเผาไหม้เชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ โดยเฉพาะเครื่องยนต์ดีเซล [8] จากการคมนาคมที่มีความหนาแน่นกว่าพื้นที่อุตสาหกรรม

ในส่วนของความเข้มข้นไอออนที่ตรวจวัดได้ กรณีแอนไอออนพบว่าทั้ง 2 เขตพื้นที่ตรวจวัดพบ SO_4^{2-} มากที่สุด รองลงมาเป็น NO_3^- และ Cl^- ตามลำดับ ส่วนแคตไอออนทั้ง 2 เขตพื้นที่ตรวจวัดพบ Na^+ มากที่สุด รองลงมาเป็น Ca^{2+} NH_4^+ และ K^+ ตามลำดับ จากการเปรียบเทียบระดับความเข้มข้นระหว่างพื้นที่พบว่า Cl^- NO_3^- และ K^+ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยในพื้นที่อุตสาหกรรมมีค่าสูงกว่าในพื้นที่เมือง จึงสันนิษฐานได้ว่ามลสารเหล่านี้จะมีแหล่งกำเนิดจากกระบวนการอุตสาหกรรมเป็นหลัก ส่วนไอออนอื่นๆ ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

เมื่อวิเคราะห์สหสัมพันธ์ของไอออนภายในแต่ละพื้นที่ ด้วยวิธี Pearson Correlation ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 กรณีพื้นที่เมืองพบว่า Cl^- NO_3^- SO_4^{2-} K^+ และ NH_4^+ มีสหสัมพันธ์ทางบวกอย่างมีนัยสำคัญทุกคู่ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าในช่วง 0.333 – 0.772 ซึ่งน่าจะชี้ว่าไอออนทั้ง 5 ชนิดมีแหล่งกำเนิดร่วมกัน ส่วนไอออนที่เหลืออีก 2 ชนิด คือ Na^+ และ Ca^{2+} ไม่มีสหสัมพันธ์กับไอออนตัวอื่น ๆ ข้างต้น ยกเว้นเพียงกรณี Na^+ ที่มีสหสัมพันธ์ทางบวกกับ SO_4^{2-} และทางลบกับ Ca^{2+} เท่านั้น จึงสันนิษฐานได้ว่าอาจมีแหล่งกำเนิดที่แตกต่างจากไอออนอื่น ๆ ส่วนกรณีพื้นที่อุตสาหกรรมพบว่าสหสัมพันธ์ระหว่างมลสารไม่ชัดเจนเท่ากับพื้นที่เมือง แต่มีรูปแบบที่คล้ายคลึงกัน ทั้งนี้รายละเอียดการวิเคราะห์แสดงไว้ในเอกสารอื่นของคณะผู้วิจัย [9]

สำหรับผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของธาตุในองค์ประกอบของ $\text{PM}_{2.5}$ จากตารางที่ 2 พบว่าในพื้นที่เมืองและพื้นที่อุตสาหกรรม มีปริมาณ Mg มากที่สุด คือ 131.80 และ $140.29 \text{ ng}/\text{m}^3$ ตามลำดับ ส่วนปริมาณธาตุที่พบน้อยที่สุด คือ Ti และ Co ซึ่งมีปริมาณ 0.08 และ $0.11 \text{ ng}/\text{m}^3$ ตามลำดับ และเมื่อทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของสองพื้นที่ที่พบว่าจากธาตุ 20 ชนิดที่วิเคราะห์ มีจำนวนครั้งหนึ่งที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ คือ Ag Al Cd Cr Fe Mn Ni Ti V และ Zn โดยพื้นที่อุตสาหกรรมมีความเข้มข้นสูงกว่าในพื้นที่เมืองทุกชนิดยกเว้น Cr ซึ่งเป็นไปตามที่คาดการณ์ไว้เนื่องจากมลสารเหล่านี้มีแหล่งกำเนิดมาจากกระบวนการทางอุตสาหกรรมของโรงงานประเภทผลิตชิ้นส่วนอะไหล่ยานพาหนะและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ภายในพื้นที่

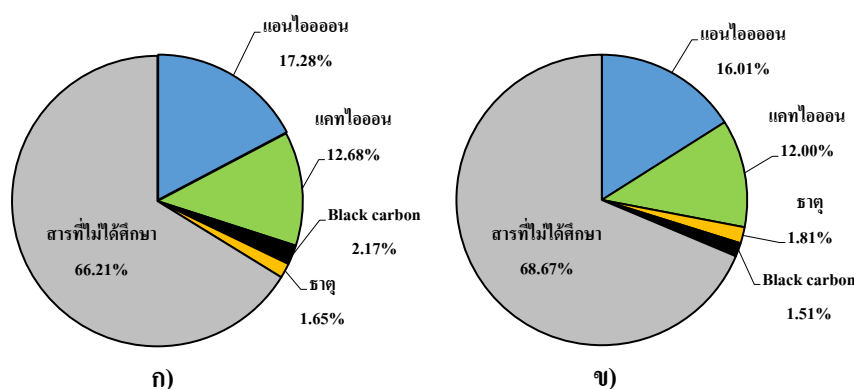
ตารางที่ 2 สถิติพรรณนาของความเข้มข้นธาตุในองค์ประกอบของ PM_{2.5}

พารามิเตอร์	เขต	Mean	Median	SD	COV	Min.	Max.	Shapiro-Wilk Test p-value	Paired t-Test p-value
หน่วย: ng/m ³ , n = 41									
Ag	เมือง	0.43	0.37	0.27	0.63	0.08	1.19	0.004*	0.000**
	อุตสาหกรรม	2.80	2.18	2.50	0.89	0.25	11.33	0.000*	
Al	เมือง	71.52	68.08	31.22	0.44	31.71	136.31	0.004*	0.009**
	อุตสาหกรรม	83.29	78.63	35.02	0.42	34.35	164.14	0.013*	
As	เมือง	1.95	0.92	2.63	1.35	0.27	12.27	0.000*	0.231
	อุตสาหกรรม	2.00	0.96	2.70	1.35	0.29	12.82	0.000*	
Ba	เมือง	15.10	13.25	8.71	0.58	5.47	44.31	0.000*	0.248
	อุตสาหกรรม	17.25	15.48	9.01	0.52	5.57	43.91	0.003*	
Cd	เมือง	0.50	0.31	0.50	1.00	0.09	2.32	0.000*	0.000**
	อุตสาหกรรม	0.95	0.75	0.62	0.65	0.31	2.79	0.000*	
Co	เมือง	0.11	0.07	0.18	1.64	0.03	1.13	0.000*	0.982
	อุตสาหกรรม	0.11	0.11	0.05	0.45	0.03	0.32	0.000*	
Cr	เมือง	114.75	114.08	9.27	0.08	99.50	148.32	0.016*	0.038**
	อุตสาหกรรม	111.27	111.88	7.87	0.07	86.83	125.95	0.223	
Cu	เมือง	16.05	11.23	15.25	0.95	2.02	70.20	0.000*	0.433
	อุตสาหกรรม	18.72	12.78	18.13	0.97	2.04	69.12	0.000*	
Fe	เมือง	87.37	67.31	48.54	0.56	27.01	226.01	0.004*	0.004**
	อุตสาหกรรม	113.96	93.34	73.77	0.65	33.67	312.80	0.001*	
Mg	เมือง	131.80	126.55	20.15	0.15	95.13	196.53	0.001*	0.154
	อุตสาหกรรม	140.29	133.22	32.46	0.23	107.79	297.08	0.000*	
Mn	เมือง	3.98	2.35	4.91	1.23	0.00	21.26	0.000*	0.001**
	อุตสาหกรรม	6.62	5.27	6.01	0.91	0.11	23.16	0.000*	
Ni	เมือง	1.14	0.88	0.87	0.76	0.18	4.79	0.000*	0.000**
	อุตสาหกรรม	3.17	2.49	2.60	0.82	0.90	13.84	0.000*	
Pb	เมือง	11.12	7.45	9.52	0.86	2.01	38.76	0.000*	0.629
	อุตสาหกรรม	11.40	6.82	10.45	0.92	1.96	43.23	0.000*	
Sb	เมือง	2.98	1.64	5.41	1.82	0.79	35.88	0.000*	0.886
	อุตสาหกรรม	2.86	1.78	2.76	0.97	0.85	15.57	0.000*	
Se	เมือง	0.81	0.64	0.59	0.73	0.20	2.58	0.000*	0.309
	อุตสาหกรรม	0.84	0.64	0.63	0.75	0.09	2.98	0.000*	
Sr	เมือง	1.63	1.24	1.05	0.64	0.64	5.07	0.000*	0.387
	อุตสาหกรรม	1.53	1.22	0.76	0.50	0.83	4.72	0.000*	
Ti	เมือง	2.24	1.98	0.83	0.37	1.04	4.65	0.002*	0.416
	อุตสาหกรรม	2.36	2.21	0.72	0.31	1.37	4.27	0.034*	
Tl	เมือง	0.08	0.05	0.07	0.88	0.01	0.31	0.000*	0.000**
	อุตสาหกรรม	0.88	0.53	0.81	0.92	0.16	3.60	0.000*	
V	เมือง	1.12	1.05	0.71	0.63	0.10	3.23	0.066	0.000**
	อุตสาหกรรม	3.93	3.29	2.37	0.60	0.75	10.04	0.014*	
Zn	เมือง	28.98	24.27	17.36	0.60	8.85	81.39	0.000*	0.006**
	อุตสาหกรรม	104.38	60.00	165.07	1.58	28.43	819.25	0.000*	

*การแจกแจงไม่เป็นแบบปกติ; **ค่าเฉลี่ยของพื้นที่เมืองและพื้นที่อุตสาหกรรมแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

3.2 การวิเคราะห์สัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีของ $PM_{2.5}$

ผลการวิเคราะห์สัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่น $PM_{2.5}$ ในสองพื้นที่ (รูปที่ 2) พบว่าพื้นที่เมืองมีสัดส่วนแอนไอออนมากที่สุด รองลงมาเป็นแคทไอออน Black Carbon และธาตุ โดยคิดเป็น 17.28% 12.68% 2.17% และ 1.65% ตามลำดับ รวมทั้งหมดคิดเป็น 33.78% ของมวล $PM_{2.5}$ ส่วนในพื้นที่อุตสาหกรรมพบว่ามีสัดส่วนแอนไอออนมากที่สุด รองลงมาเป็นแคทไอออน ธาตุ และ Black Carbon โดยคิดเป็น 16.00% 12.00% 1.81% และ 1.51% ตามลำดับ รวมทั้งหมดคิดเป็น 31.32% ของมวล $PM_{2.5}$ สำหรับองค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ ที่ไม่ได้ทำการศึกษาในฝุ่นละอองทั้ง 2 พื้นที่ มีสัดส่วน 66.21% และ 68.66% ตามลำดับ ซึ่งองค์ประกอบที่ไม่ได้ศึกษานี้ ได้แก่ Organic Carbon, Elemental Carbon, Organic Compound และสารอื่น ๆ อาทิ PAHs, VOCs, Organic Acid และธาตุอื่น ๆ ทั้งนี้ มีข้อสังเกตว่าในพื้นที่เมืองและพื้นที่อุตสาหกรรมมีสัดส่วนสารไอออนิกที่เหมือนกัน คือ สัดส่วนแคทไอออนมากที่สุด รองลงมาเป็นแอนไอออน แต่ต่างกันที่สัดส่วนของ Black Carbon และธาตุ ซึ่งเป็นไปตามข้อสันนิษฐานที่กล่าวไปข้างต้น คือ พื้นที่เมืองมีสัดส่วน Black Carbon สูงกว่าเนื่องจากการจราจรที่หนาแน่นและกิจกรรมการเผาไหม้ชีวมวล ส่วนพื้นที่อุตสาหกรรมมีสัดส่วนธาตุสูงกว่าซึ่งมาจากแหล่งกำเนิดในกระบวนการผลิตในโรงงาน



รูปที่ 2 การจำแนกสัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีของ $PM_{2.5}$ ก) พื้นที่เมือง ; ข) พื้นที่อุตสาหกรรม

เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ศึกษาองค์ประกอบของ $PM_{2.5}$ ในเมืองใหญ่อื่น ๆ (ตารางที่ 3) พบว่า ระดับ $PM_{2.5}$ เฉลี่ยของเมืองนครราชสีมาอยู่ในระดับปานกลางเมื่อเทียบกับเมืองใหญ่ในประเทศแถบเอเชีย แต่มีค่าค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับผลการศึกษาในประเทศในทวีปยุโรปและอเมริกา ในด้านสัดส่วนทางเคมี งานวิจัยทุกงานพบแอนไอออนเป็นองค์ประกอบมากที่สุดเช่นเดียวกัน ส่วนค่ารองลงมาเป็นแคทไอออน ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษานี้ อย่างไรก็ตามบางงานวิจัยรายงานสัดส่วนของธาตุสูงกว่า ทั้งนี้เนื่องจากธาตุที่ถูกเลือกทำการศึกษามีหลายชนิดและบางงานวิจัยทำการศึกษานิดของแคทไอออนไม่มากนัก นอกจากนี้จะเห็นได้ว่างานวิจัยอื่นพบปริมาณ Black Carbon ในพื้นที่เมืองมากกว่าพื้นที่อุตสาหกรรม และพบว่าองค์ประกอบที่เป็นธาตุใน $PM_{2.5}$ มีปริมาณน้อยซึ่งได้สอดคล้องกับการศึกษานี้ แม้ว่าบางงานวิจัยจะมีสัดส่วนธาตุค่อนข้างมากแต่ก็เนื่องมาจากได้ทำการศึกษาธาตุหลายชนิดมากกว่างานอื่น ๆ ทั้งนี้ สังเกตว่าสัดส่วนสารที่ไม่ได้ศึกษามีความแตกต่างกันสูงเนื่องจากความละเอียดของการวิเคราะห์แตกต่างกัน โดยงานวิจัยนี้มีสัดส่วนดังกล่าวในช่วงปานกลางเมื่อเทียบกับงานอื่น

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบสัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่น $PM_{2.5}$ ในพื้นที่เมืองกับงานวิจัยอื่น

อ้างอิง	สถานที่	ความเข้มข้นเฉลี่ย (µg/m ³)	องค์ประกอบทางเคมี (%)							
			แอนไอออน	แคทไอออน	ธาตุ	Black carbon	Elemental carbon	Organic carbon	สารอื่น ๆ	สารที่ไม่ได้ศึกษา
พื้นที่ศึกษาเขตเมือง										
การศึกษานี้	นครราชสีมา	29.93	17.28	12.68	1.65	2.17	-	-	-	66.21
[10]	- ปทุมธานี	23.30	-	-	13.97	30.55	-	-	-	55.48
	- กทม.	19.46	-	-	15.24	21.47	-	-	-	63.29
[11]	ประเทศสหรัฐอเมริกา	9.34	33.51	7.49	17.87	-	4.07	26.55	-	10.50
[12]	ประเทศเกาหลีใต้	42.56	27.26	12.38	6.18	-	4.20	18.88	-	31.11
[13]	ประเทศแคนาดา	8.59	-	-	8.16	-	-	-	-	91.84
[14]	ประเทศเม็กซิโก	45.00	14.69	-	22.50	-	10.64	14.44	-	37.72
พื้นที่ศึกษาเขตอุตสาหกรรม										
การศึกษานี้	นครราชสีมา	34.71	16.00	12.00	1.81	1.51	-	-	-	68.66
[15]	ประเทศปากีสถาน	83.53	26.50	-	0.58	-	-	-	-	72.92
[16]	เขตอุตสาหกรรม									
	- เกษตร	135.70	-	-	3.76	0.91	-	-	-	95.33
	- กลั่นปิโตรเลียม	37.20	-	-	10.50	2.96	-	-	-	86.54
	ประเทศไนจีเรีย									
[17]	ประเทศจีน	175.00	27.89	13.26	2.62	-	2.23	11.49	13.71	28.81
[18]	ประเทศอิตาลี	15.09	24.41	12.65	2.97	-	-	-	10.17	49.80
[19]	ประเทศฝรั่งเศส	32.50	38.15	13.74	1.57	-	-	-	16.02	30.52
[20]	ประเทศคอซอวอ	36.00	15.92	4.31	10.60	-	9.86	34.86	-	24.45

4. สรุป

ผลการศึกษพบว่าระดับความเข้มข้น $PM_{2.5}$ เฉลี่ย 24 ชั่วโมง ในพื้นที่เมืองมีค่าเฉลี่ย $29.93 \mu g/m^3$ ต่ำกว่าพื้นที่อุตสาหกรรมซึ่งมีค่าเฉลี่ย $34.71 \mu g/m^3$ โดยสันนิษฐานว่าในพื้นที่เมืองมีแหล่งกำเนิดสำคัญจากคมนาคมและการเผาไหม้ชีวมวล ส่วนในพื้นที่อุตสาหกรรมเกิดจากกระบวนการผลิตของโรงงานและการขนส่ง ในทางตรงกันข้าม ความเข้มข้นของ Black Carbon ในพื้นที่เมืองสูงกว่าพื้นที่อุตสาหกรรม เนื่องจากการคมนาคมที่มีความหนาแน่นมากกว่า ส่วนความเข้มข้นของสารไอออนิกใน 2 พื้นที่ พบว่า SO_4^{2-} มีปริมาณเฉลี่ยมากที่สุด และพบว่า Cl^- , NO_3^- และ K^+ ในพื้นที่อุตสาหกรรมสูงกว่าพื้นที่เมืองอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของธาตุทั้ง 2 พื้นที่พบว่า Mg มีปริมาณมากที่สุดและ พบว่า Ag Al Cd Fe Mn Ni Ti V และ Zn ในพื้นที่อุตสาหกรรมสูงกว่าในพื้นที่เมือง โดยคาดว่าแหล่งกำเนิดจากโรงงานผลิตชิ้นส่วนอะไหล่รถยนต์ จักรยานยนต์ และอิเล็กทรอนิกส์ที่มีมากในเขตอุตสาหกรรมสุรนารี นอกจากนี้ เมื่อวิเคราะห์สัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีที่ตรวจวัดใน $PM_{2.5}$ ทั้ง 2 พื้นที่ พบว่าพื้นที่เมืองมีสัดส่วนแอนไอออนมากที่สุด รองลงมาเป็นแคทไอออน Black Carbon และธาตุ ตามลำดับ ส่วนพื้นที่อุตสาหกรรมมีสัดส่วนแอนไอออนมากที่สุด รองลงมาเป็นแคทไอออน ธาตุ และ Black Carbon ตามลำดับ ผลการศึกษานี้ทำให้ทราบถึงระดับของมลพิษอากาศจาก $PM_{2.5}$ ในปัจจุบันของเมืองนครราชสีมาและแหล่งกำเนิดฝุ่นละอองที่สำคัญ ซึ่งหน่วยงานที่

เกี่ยวข้องสามารถนำไปใช้ประโยชน์ และผลการวิเคราะห์สามารถนำไปใช้กับแบบจำลองผู้รับ (Receptor Model) ในการทำนายแหล่งกำเนิดมลสารในการศึกษาขั้นต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนโครงการวิจัยเพื่อทำวิทยานิพนธ์ระดับบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Hopke, P.K. *et al.* Urban air quality in the Asian region. *Science of the Total Environment*, 2008, 404, pp. 103–112.
- [2] Air Quality and Noise Management Bureau. *Thailand's air quality and situation reports*. Phaya Thai, Bangkok: Pollution Control Department, 2017. Available from: <http://air4thai.pcd.go.th/webV2/download.php> [Accessed 30 October 2017].
- [3] US EPA. *Quality Assurance Guidance Document 2.12.; Monitoring PM_{2.5} in Ambient Air Using Designated Reference or Class I Equivalent Methods*. New York, USA: Office of Air Quality Planning and Standards Air Quality Assessment Division, 2016. Available from: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P100OI8X.PDF?Dockey=P100OI8X.PDF> [Accessed 30 May 2016].
- [4] Chow, J.C., Watson, J.G. Ion chromatography in elemental analysis of airborne particles. *Elemental Analysis of Airborne Particles*, 1999, 1, pp. 97-137.
- [5] US EPA. *Method IO-3.4 Determination of Metals in Ambient Particulate Matter Using Inductively Coupled Plasma (ICP) Spectroscopy*. Ohio, USA: Center for Environmental Research Information Office of Research and Development, 1999. Available from: <https://www3.epa.gov/ttnamti1/files/ambient/inorganic/mthd-3-4.pdf> [Accessed 2 February 2016].
- [6] Kim Oanh, N.T. *et al.* Designing ambient particulate matter monitoring program for source apportionment study by receptor modeling. *Atmospheric Environment*, 2009, 43, pp. 3334-3344.
- [7] GIZ–Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit. *Emission Inventory of Major Air Pollutants in Nakhon Ratchasima Municipality (NRM)*, March 2014. Available from: http://www.citiesforcleanair.org/?page_id=42 [Accessed 30 October 2016].
- [8] WHO. *Health effects of black carbon*. Copenhagen, Denmark: WHO, 2012. Available from: <https://bit.ly/2pQTC1w> [Accessed 20 July 2017].
- [9] Thongsang P, Karuchit S, Pongkiatkul P. Analyses of PM_{2.5} in Urban and Industrial Zones of Nakhon Ratchasima City. In: *16th National Environmental Conference*, Bangkok, 17-18 May 2017, Thailand. pp. 1-8.
- [10] Wimolwattanapum, W. *et al.* Source apportionment and potential source locations of PM_{2.5} and PM_{2.5-10} at residential sites in metropolitan Bangkok. *Atmospheric Pollution Research*, 2011, 2, pp. 172-181.
- [11] Han, F. *et al.* Source apportionment of PM_{2.5} in Baton Rouge, Louisiana during 2009-2014. *Science of the Total Environment*, 2017, 5 (86), pp. 115-126.
- [12] Choi, J.K. *et al.* Source apportionment of PM_{2.5} at the coastal area in Korea. *Science of the Total Environment*, 2013, 447, pp. 370-380.
- [13] Landis, M.S. *et al.* Source apportionment of ambient fine and coarse particulate matter at the Fort McKay community site, in the Athabasca Oil Sands Region, Alberta, Canada. *Science of the Total Environment*, 2017, 584, pp. 105-117.
- [14] Murillo, J.H. *et al.* Chemical composition of PM_{2.5} particles in Salamanca, Guanajuato Mexico: Source apportionment with receptor models. *Atmospheric Research*, 2012, 107, pp. 31-41.
- [15] Mansha, M. *et al.* Characterization and source apportionment of ambient air particulate matter (PM_{2.5}) in Karachi. *Science of the Total Environment*, 2012, 425, pp. 176-183.
- [16] Orogade, S.A. *et al.* Source apportionment of fine and coarse particulate matter in industrial areas of Kaduna, Northern Nigeria. *Aerosol and Air Quality Research*, 2016, 16, pp. 1179-1190.

- [17] Geng, N. *et al.* (2013). PM_{2.5} in an industrial district of Zhengzhou, China: Chemical composition and apportionment. *Particuology*, 2013, 11, pp. 99-109.
- [18] Cesari, D. *et al.* Source apportionment of PM_{2.5} in the harbor-industrial area of Brindisi (Italy): Identification and estimation of the contribution of in-port ship emissions. *Science of the Total Environment*, 2014, 497-498, pp. 392-400.
- [19] Ledoux, F. *et al.* Contributions of local and regional anthropogenic sources of metals in PM_{2.5} at an urban site in northern France. *Chemosphere*, 2017, 181, pp. 713-724.
- [20] Murillo, J.H. *et al.* Chemical characterization and source apportionment of PM₁₀ and PM_{2.5} in the metropolitan area of Costa Rica, Central America. *Atmospheric Pollution Research*, 2013, 4, pp. 181-190.