

PRZYKŁAD WYKORZYSTANIA PRÓBNIKÓW PASYWNYCH DO OCENY PRZESTRZENNEGO ZRÓŻNICOWANIA STĘŻEŃ ZANIECZYSZCZEŃ W POWIETRZU MIEJSKIM

inż. Paulina Bździuch, inż. Angelika Zemełka,
inż. Kamil Koziół, inż. Joanna Żołyniak,
inż. Ewelina Bączek, inż. Barbara Rososińska,
dr inż. Robert Oleniacz, dr inż. Marek Bogacki ¹

Streszczenie: W referacie przedstawiono ocenę przestrzennego zróżnicowania stężeń wybranych zanieczyszczeń gazowych w powietrzu miejskim z wykorzystaniem wyników pomiarów wykonanych metodą pasywną. Badania zostały przeprowadzone na terenie miasta Sucha Beskidzka w sezonie zimowym (2014/2015) oraz miasta Krakowa w sezonie letnim (rok 2015). Analizami objęto trzy podstawowe substancje zanieczyszczające powietrze, dla których możliwe było zastosowanie próbników pasywnych – dwutlenek azotu (NO₂), dwutlenek siarki (SO₂) oraz dodatkowo benzenu. Czas ekspozycji próbników pasywnych wynosił jeden miesiąc. W Suchej Beskidzkiej i Krakowie wykonano odpowiednio dwie i trzy serie pomiarowe dla NO₂ i SO₂ (po 12 punktów pomiarowych). Pomiary stężeń benzenu wykonano tylko w Krakowie w 10 punktach położonych w rejonie jednej stacji paliwowej. Na podstawie wyników przeprowadzonych pomiarów opracowano mapy przestrzennych rozkładów stężeń zanieczyszczeń z wykorzystaniem oprogramowania ArcGIS i przeprowadzono dyskusję związaną z uzyskaną zmiennością stężeń.

Słowa kluczowe: jakość powietrza; pomiary stężeń; NO₂; SO₂; benzen; metoda pasywna

1. Wprowadzenie

Rozwój przemysłu, stosowanie niskiej jakości paliw kopalnych, jak również ciągły wzrost liczby pojazdów, powodują uwalnianie do atmosfery coraz większej ilości substancji zanieczyszczających. Oddziałują one niekorzystnie nie tylko na zdrowie ludzi, ale mają także negatywny wpływ na spadek bioróżnorodności organizmów żywych, korozję metali i niszczenie konstrukcji budowlanych, a także przyczyniają się do ocieplania klimatu.

¹ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Katedra Kształtowania i Ochrony Środowiska, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, tel. + 48 (12) 6174503, fax: +48 (12) 6335076, e-mail: oleniacz@agh.edu.pl; bogacki@agh.edu.pl

Kraków i inne miasta południowej Polski borykają się z problemem złej jakości powietrza, głównie w zakresie ponadnormatywnych poziomów pyłu zawieszonego PM₁₀ i PM_{2,5} oraz podwyższonych stężeń niektórych zanieczyszczeń gazowych, do których (w zależności od lokalizacji i rozpatrywanego okresu roku) należy zaliczyć NO₂ i SO₂ [1, 2]. W celu podjęcia działań naprawczych, konieczne jest wcześniejsze poznanie czynników determinujących występowanie ponadnormatywnych stężeń substancji w powietrzu atmosferycznym. W skali krajowej stężenia tych zanieczyszczeń są kontrolowane w ramach Państwowego Monitoringu Środowiska, którego zadaniem jest uzyskiwanie informacji i danych dotyczących poziomów substancji w powietrzu oraz dostarczanie wyników analiz i ocen w zakresie przestrzegania standardów jakości powietrza.

W niniejszym opracowaniu przedstawiono możliwość wykorzystania próbników pasywnych do oceny przestrzennego zróżnicowania stężeń zanieczyszczeń, w oparciu o pomiary zrealizowane w ramach działalności studenckiego Koła Naukowego Inżynierii Ochrony Powietrza działającego na Wydziale Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH przy współpracy z Katedrą Kształtowania i Ochrony Środowiska. Analizą objęto teren dwóch małopolskich miast – Suchej Beskidzkiej i Krakowa, gdzie wykonano pomiary stężeń NO₂ i SO₂ w powietrzu. Ponadto przeprowadzono badania mające na celu określenie przestrzennego zróżnicowania stężeń benzenu w obrębie i w pobliżu stacji paliw zlokalizowanej w centrum Krakowa.

Do pomiaru stężeń ww. substancji zastosowano pasywną technikę poboru próbek z wykorzystaniem specjalnie do tego celu przeznaczonych próbników, które poddawane były ekspozycji przez określony czas w danym punkcie pomiarowym. Metoda pasywna jest prostą i taną techniką pomiarową, pozwalającą w większości przypadków na wielodniową ekspozycję próbek bez nadzoru oraz bez konieczności stosowania dodatkowych urządzeń (np. zasilających) [3]. Metoda ta z uwagi na ww. zalety stosowana jest coraz częściej dla obszarów, w których uwarunkowania techniczne lub ekonomiczne uniemożliwiają zastosowanie bardziej złożonych metod pomiarowych. Przykładem może być tutaj wykorzystanie jej w monitoringu zanieczyszczeń powietrza na terenach leśnych i obszarach parków narodowych [4, 5]. Również wojewódzkie inspektoraty ochrony środowiska korzystają z tej metody w ramach monitoringu regionalnego [6].

Podobne do prezentowanych w niniejszej pracy badania przestrzennego zróżnicowania stężeń NO₂ i/lub SO₂ z wykorzystaniem próbników pasywnych realizowane były także w innych polskich miastach, takich jak np. Krościenko n. Dunajcem [7], Opole [8] czy Bielsko-Biała [9]. W Krakowie, Damaszku i Florencji metodą tą oceniano wpływ zanieczyszczeń powietrza na stan zabytków architektonicznych [10, 11]. Analizowany był też wpływ transportu drogowego na zróżnicowanie stężeń NO₂ w powietrzu [12, 13]. Metoda

pasywna znajduje także zastosowanie w okresowych pomiarach stężeń w powietrzu m.in. NH_3 , O_3 , LZO (w tym benzen), PCDD/Fs, PCBs i WWA [14-21].

2. Metodyka badań

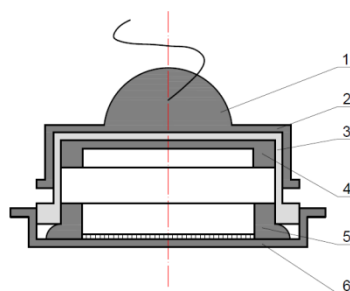
W przeprowadzonych badaniach wykorzystano próbniki pasywne pozwalające na jednoczesny pomiar stężeń NO_2 i SO_2 oraz próbniki pasywne do pomiaru stężeń benzenu w powietrzu.

Początkowo w Polsce stosowany był pasywny próbnik Amaya-Sugiura służący wyłącznie do oznaczania stężenia NO_2 metodą spektrofotometryczną zgodnie z normą PN 89/Z-04092/08 [22]. Zakład Chemii Analitycznej Politechniki Krakowskiej opracował modyfikację japońskiego próbniaka, pozwalającą na równoczesne oznaczanie stężeń NO_2 i SO_2 metodą chromatografii jonowej z wyeliminowaniem lub ilościowym określeniem wpływu wybranych czynników meteorologicznych [23-25]. W metodzie tej badane substancje docierają do wnętrza próbniaka dzięki zjawisku samoistnej dyfuzji gazów oraz ich pochłanianiu na odpowiednio dobranym absorbencie. Masa zatrzymanego składnika jest proporcjonalna do jego stężenia w powietrzu i do czasu ekspozycji. Podstawę próbniaka stanowi jego środkowa część wykonana z barwionego na czarno polietylenu. Elementem absorbującym jest siateczka ze stali nierdzewnej pokryta filmem trietanolaminy. W celu zminimalizowania wpływu wiatru na wynik oznaczenia oraz zapobiegania przedostawania się pyłu do wnętrza próbniaka, wlot do jego środkowej części zamyka się pierścieniem z włókniną polipropylenową. Schemat tego typu próbniaka pasywnego przedstawiono na rysunku 1. Próbniki stosowane do oznaczania stężeń benzenu w powietrzu są podobne do próbników wykorzystywanych do oznaczania NO_2 i SO_2 . Sorbentem jest tutaj jednak węgiel aktywny. Po ekspozycji na stanowiskach pomiarowych benzen jest ekstrahowany w laboratorium z użyciem dwusiarczku węgla i oznaczany metodą chromatografii gazowej.

Pomiary stężeń NO_2 i SO_2 w powietrzu wykonano w Suchej Beskidzkiej (w sezonie zimowym) i Krakowie (w sezonie letnim). W Suchej Beskidzkiej przeprowadzono dwie 1-miesięczne serie pomiarowe w okresie od 10.12.2014 do 10.02.2015 r. W ramach każdej serii pomiarowej wykorzystano 12 próbników pasywnych rozmieszczonych stosunkowo równomiernie w obrębie miasta (rys. 2), przeważnie na wysokości ok. 2-3 m n.p.t.

Na terenie miasta Krakowa również rozmieszczono 12 punktów pomiarowych, w tym 3 na terenie kampusu AGH (rys. 3). Badania wykonywane były w trzech 1-miesięcznych seriach pomiarowych w miesiącach czerwiec, lipiec i sierpień 2015 r. Dodatkowe pomiary stężeń benzenu w powietrzu (jedna

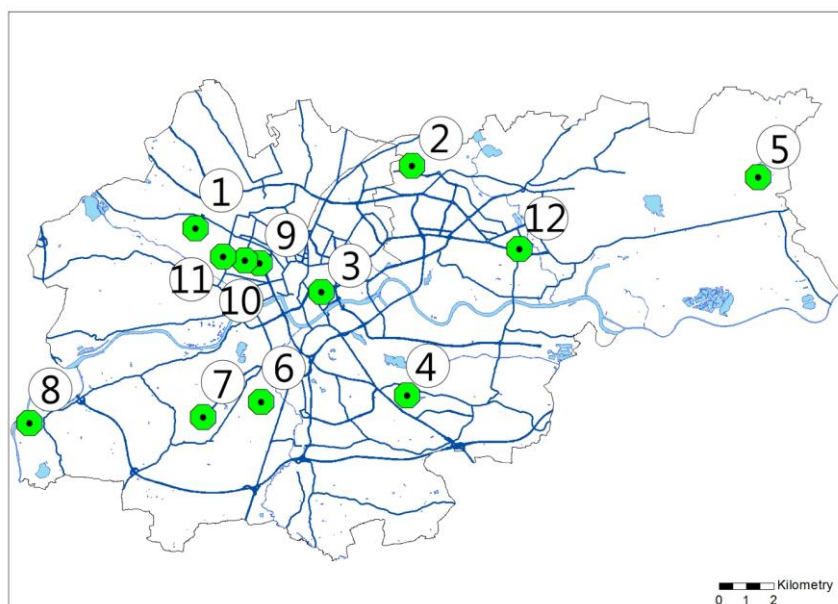
seria pomiarowa z ekspozycją trwającą 32 dni) wykonano na przełomie maja i czerwca 2015 r. w Krakowie w rejonie stacji paliw zlokalizowanej w centrum miasta, przy ul. Kazimierza Wielkiego. W obrębie stacji oraz w jej sąsiedztwie rozmieszczono w sumie 10 punktów, w tym dwa punkty na wysokości drugiego i czwartego piętra pobliskiego budynku (rys. 4). Otrzymane wyniki zostały odniesione do dopuszczalnych stężeń średniorocznych określonych dla poszczególnych substancji w powietrzu [26] oraz wyników pomiarów prowadzonych w analogicznym okresie przez Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska (WIOŚ) w Krakowie [27].



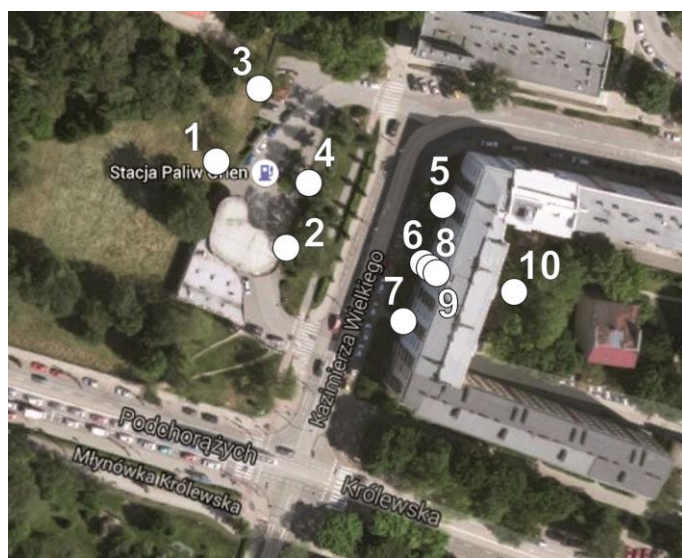
Rys. 1. Schemat próbnika pasywnego: 1 – uchwyt, 2 – część środkowa, 3 – pierścień dociskający, 4 – krążek absorbujący, 5 – pierścień z porowatą membraną, 6 – zatyczka (opracowanie własne na podstawie [23])



Rys. 2. Położenie punktów pomiarowych (miejsc ekspozycji próbników pasywnych NO_2 i SO_2) na terenie miasta Sucha Beskidzka



Rys. 3. Położenie punktów pomiarowych (miejsc ekspozycji próbników pasywnych NO₂ i SO₂) na terenie miasta Krakowa



Rys. 4. Położenie punktów pomiarowych (miejsc ekspozycji próbników pasywnych benzenu) w rejonie stacji paliw przy ul. Kazimierza Wielkiego w Krakowie

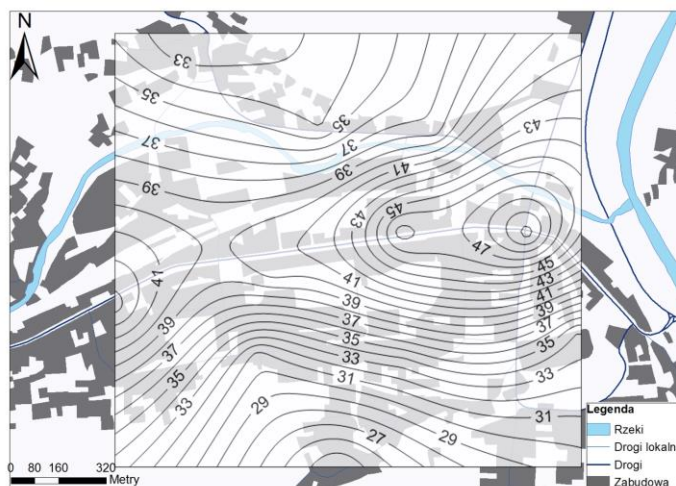
3. Wyniki badań

3.1. Sucha Beskidzka – pomiary stężeń NO_2 i SO_2 w okresie zimowym

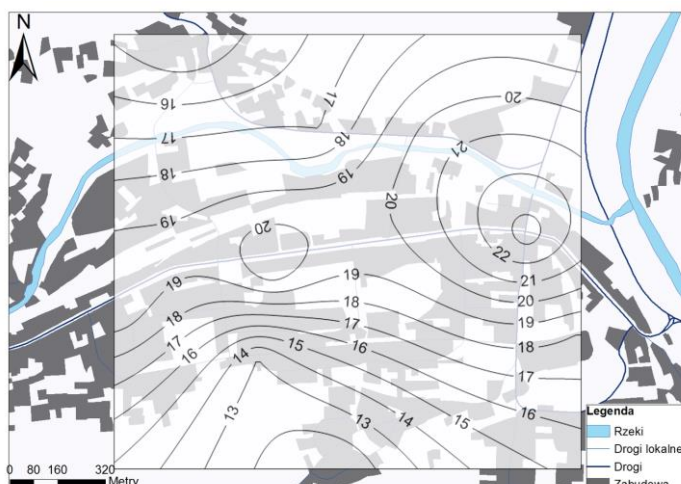
Wyniki pomiarów stężeń NO_2 i SO_2 w powietrzu otrzymane w punktach zlokalizowanych na terenie miasta Sucha Beskidzka przedstawiono w tabeli 1, a przestrzenne rozkłady stężeń średnich uzyskanych dla obydwu serii pomiarowych na rysunku 5 i 6.

Tabela 1 Średnie miesięczne stężenia NO_2 i SO_2 w powietrzu otrzymane dla dwóch serii pomiarowych na terenie Suchoj Beskidzkiej w okresie 10.12.2014 – 10.02.2015

Nr punktu	Stężenie NO_2 , $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$			Stężenie SO_2 , $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$		
	I seria	II seria	średnia	I seria	II seria	średnia
1	36	45	41	21	15	18
2	35	40	38	21	20	21
3	32	36	34	18	16	17
4	29	35	32	16	12	14
5	48	53	51	22	25	24
6	44	51	48	20	20	20
7	41	41	41	21	21	21
8	41	46	44	19	21	20
9	32	36	34	16	20	18
10	33	34	34	14	18	16
11	27	34	31	12	14	13
12	24	24	24	12	10	11
średnia	35	40	38	18	18	18



Rys. 5. Przestrzenny rozkład średnich stężeń NO_2 w powietrzu w Suchoj Beskidzkiej w analizowanym okresie (10.12.2014 – 10.02.2015), $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$



Rys. 6. Przestrzenny rozkład średnich stężeń SO_2 w powietrzu w Suchej Beskidzkiej w analizowanym okresie (10.12.2014 – 10.02.2015), $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Zgodnie z rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 24 sierpnia 2012 r. w sprawie poziomów niektórych substancji w powietrzu [26], dopuszczalne poziomy NO_2 i SO_2 w powietrzu dla czasu uśredniania 1 godzina wynoszą odpowiednio 200 i 350 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, a dla czasu uśredniania 1 rok kalendarzowy wynoszą odpowiednio 40 i 20 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (w tym drugim przypadku wartość dopuszczalna obowiązująca tylko z punktu widzenia ochrony roślin). W przypadku SO_2 jest jeszcze określone dopuszczalne stężenie 24-godzinne, wynoszące 125 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ [26].

Otrzymane wyniki pomiarów są dużo niższe od dopuszczalnych poziomów 1-godzinnych NO_2 i SO_2 oraz dopuszczalnego poziomu 24-godzinnego SO_2 . Dla 1-miesięcznego czasu uśredniania uzyskanych wyników pomiarów bardziej adekwatne wydaje się być jednak odniesienie do dopuszczalnego stężenia średniorocznego. W zależności od substancji i serii pomiarowej od 33 do 50% uzyskanych wyników przekraczało określone dla tych substancji dopuszczalne poziomy średnioroczne (maksymalnie o ok. 33%). Nie oznacza to jednak, że w danym punkcie nie są dotrzymywane standardy jakości powietrza, gdyż pomiary te wykonywane były w okresie zimowym (sezonie grzewczym), kiedy stężenia analizowanych substancji są zwykle znacznie wyższe niż w okresie letnim (sezonie pozagrzewczym).

Najwyższe stężenia NO_2 zaobserwowano w punktach pomiarowych nr 5, 6, 7 i 8, położonych przy ruchliwych skrzyżowaniach, w tym w rejonie Rynku (punkt nr 5) oraz wzdłuż głównej drogi przebiegającej przez centrum miasta (ul. Mickiewicza). Przyczyną podwyższonych w tym miejscu stężeń może być więc

wzmożony ruch drogowy, zwłaszcza w godzinach szczytu oraz charakterystyczny dla okresu zimowego dłuższy czas dochodzenia silników spalinowych i katalizatorów spalin do optymalnych warunków pracy, co wiąże się ze zwiększoną emisją zanieczyszczeń komunikacyjnych do powietrza. Dodatkowym czynnikiem wpływającym na poziom stężeń zanieczyszczeń w powietrzu w okresie zimowym jest zjawisko inwersji temperatury, która ogranicza dyspersję zanieczyszczeń w powietrzu.

Pomimo że najwyższe wartości stężeń SO_2 w powietrzu w Suchej Beskidzkiej także wystąpiły w rejonie Rynku, o poziomie tych stężeń w okresie zimowym decyduje głównie stosowanie do celów grzewczych zasilanych paliw. Wzmoczona w sezonie grzewczym niska emisja SO_2 pochodząca głównie z palenisk domowych może być szczególnie uciążliwa dla zdrowia mieszkańców centrum Suchej Beskidzkiej w sytuacji utrzymywania się przez dłuższy czas bezwietrznej pogody i mgły. Brak przewietrzania powoduje bowiem kumulowanie się zanieczyszczeń w pobliżu źródeł emisji, a przewietrzanie to nie ułatwia gęsta zabudowa oraz położenie centrum miasta w dolinie (kotlinie) otoczonej prawie z każdej strony wysokimi wzniesieniami i pasmami górskimi.

Przeprowadzone pomiary przypadły akurat na okres, w którym w Suchej Beskidzkiej zaprzestano eksploatacji stacji automatycznego monitoringu jakości powietrza WIOŚ (stacja tła miejskiego zlokalizowana przy ul. Handlowej), która pracowała w sposób ciągły od listopada 2011 r. do grudnia 2014 r., po czym została zlikwidowana i do tej pory nie znaleziono dla niej nowej lokalizacji. Nie mniej jednak zbliżone do średnich stężeń NO_2 i SO_2 zmierzonych metodą pasywną były wyniki średnie miesięczne obserwowane na tej stacji w latach 2013 i 2014 w styczniu i lutym (NO_2) oraz w marcu i kwietniu (SO_2). W styczniu i lutym 2013 i 2014 r. średnie stężenia SO_2 na stacji WIOŚ kształtowały się na poziomie $40\text{--}47\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ [27], a więc były ok. dwa razy wyższe niż średnie obszarowe stężenie tej substancji przedstawione w niniejszej pracy w oparciu o wyniki pomiarów przeprowadzonych w Suchej Beskidzkiej w okresie 10.12.2014 – 10.02.2015. Może to świadczyć o tym, że ww. stacja tła miejskiego pozwalała w okresie zimowym na ocenę reprezentatywnych dla obszaru miasta średnich stężeń NO_2 , natomiast mierzone przez nią stężenia SO_2 prawdopodobnie były znacznie wyższe w stosunku do stężenia średniego występującego na terenie Suchej Beskidzkiej. Należy jednak pamiętać, że stosowanie próbników pasywnych zalicza się do metod wskaźnikowych, których nie można wprost porównywać z wynikami pomiarów uzyskanych metodami referencyjnymi stosowanymi na stacjach WIOŚ.

3.2. Kraków – pomiary stężeń NO₂ i SO₂ w okresie letnim

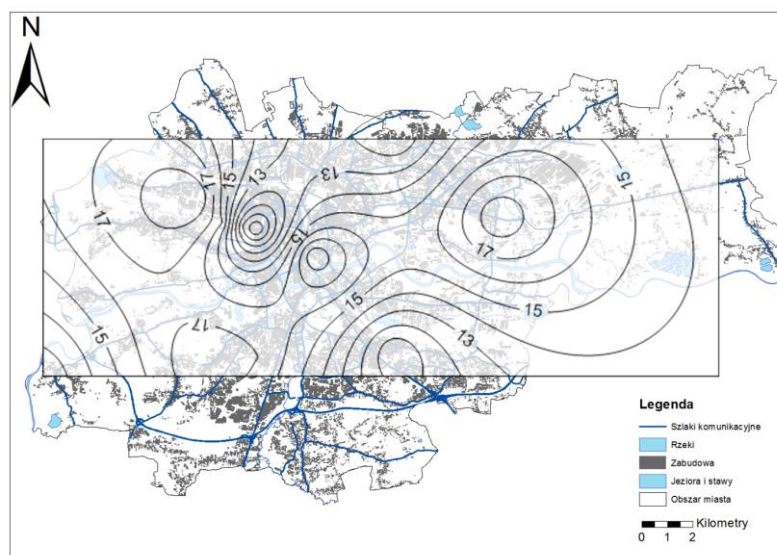
Wyniki pomiarów stężeń NO₂ i SO₂ w powietrzu otrzymane w sezonie letnim w punktach zlokalizowanych na terenie miasta Krakowa zestawiono w tabeli 2, a przestrzenne rozkłady stężeń średnich uzyskanych dla trzech serii pomiarowych przedstawiono na rysunkach 7 i 8.

Tabela 2 Średnie miesięczne stężenia NO₂ i SO₂ w powietrzu otrzymane dla trzech serii pomiarowych na terenie Krakowa w okresie czerwiec – sierpień 2015

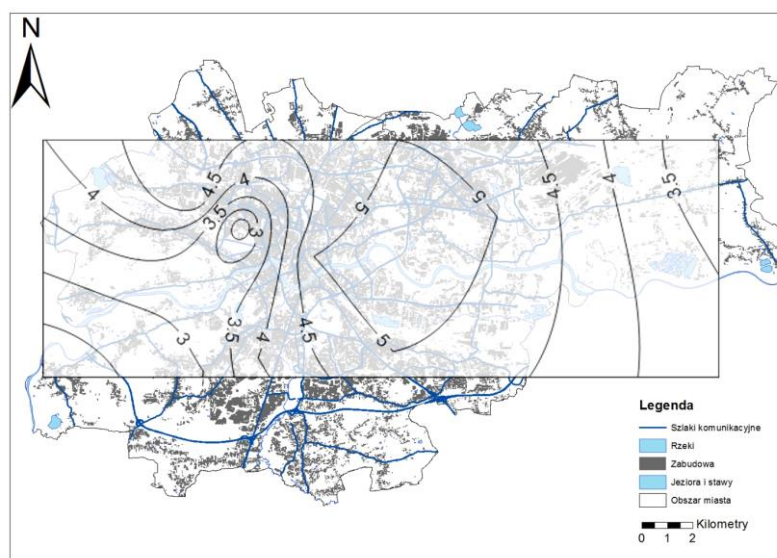
Nr punktu	Stężenie NO ₂ , µg·m ⁻³				Stężenie SO ₂ , µg·m ⁻³			
	I seria	II seria	III seria	średnia	I seria	II seria	III seria	średnia
1	20	15	23	19	9	5	2	5,3
2	14	11	9	11	10	2	2	4,7
3	15	15	27	19	9	4	2	5,0
4	17	5	7	10	11	2	1	4,7
5	12	13	14	13	5	2	2	3,0
6	15	12	23	17	5	3	3	3,7
7	17	16	21	18	6	2	2	3,3
8	10	9	18	12	5	0	1	2,0
9	11	8	5	8	6	2	0	2,7
10	13	14	3	10	5	0	0	1,7
11	14	13	21	16	8	1	1	3,3
12	20	18	20	19	10	2	1	4,3
średnia	15	12	16	14	7,4	2,1	1,4	3,6

Ze względu na prowadzenie pomiarów w okresie letnim, stężenia NO₂ i SO₂ w powietrzu w Krakowie w poszczególnych punktach otrzymano na poziomie znacznie mniejszym (zwłaszcza w przypadku SO₂) w porównaniu z wynikami uzyskanymi w Suchej Beskidzkiej w okresie zimowym. Podobnie jednak jak miało to miejsce w Suchej Beskidzkiej, najwyższe stężenia NO₂ zostały zaobserwowane w bliskiej odległości od ruchliwych ulic. W przypadku SO₂ wyraźne maksimum stężeń otrzymano w rejonie lokalizacji elektrociepłowni EDF Polska Oddział I w Krakowie, w obszarze położonym w odległości ok. 2-3 km od zakładu. W analizowanym okresie zakład ten faktycznie mógł stanowić główne źródło emisji kształtujące stężenia SO₂ w powietrzu w Krakowie.

Z uwagi na stosunkowo małą liczbę punktów pomiarowych, przedstawione na rysunkach 7 i 8 przestrzenne rozkłady stężeń analizowanych substancji dla tak dużego miasta, jak Kraków, należy traktować jako przybliżone. Odnosząc się do samych wartości średnich uzyskanych dla obszaru objętego pomiarami w analizowanym okresie, można stwierdzić, że średnie obszarowe stężenie w przypadku NO₂ jest o ok. 40-50% mniejsze w stosunku do średnich miesięcznych wyników pomiarów uzyskanych w okresie od czerwca do sierpnia 2015 r. na stacjach monitoringu powietrza WIOŚ w Krakowie, wynoszących 22-24 µg·m⁻³ (stacja Nowa Huta) i 27-30 µg·m⁻³ (stacja Kurdwanów) [27].



Rys. 7. Przestrzenny rozkład średniomiesięcznych stężeń NO_2 w powietrzu w Krakowie w analizowanym okresie (czerwiec – sierpień 2015), $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$



Rys. 8. Przestrzenny rozkład średniomiesięcznych stężeń SO_2 w powietrzu w Krakowie w analizowanym okresie (czerwiec – sierpień 2015), $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Z kolei w przypadku SO_2 średnie obszarowe stężenie w lecie 2015 r. otrzymano na poziomie ok. $3,6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, co stanowi wynik większy o ok. 50% od średniego stężenia tej substancji zmierzonego w tym samym okresie na stacji

Kurdwanów ($2,4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) i o ok. 40% mniejszy od średniego stężenia tej substancji zmierzonego wtedy na stacji Nowa Huta ($6,2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) [27].

3.3. Kraków – pomiary stężeń benzenu w okresie letnim (stacja paliw)

Wyniki przeprowadzonych pomiarów stężeń benzenu w powietrzu w rejonie stacji paliw przy ul. Kazimierza Wielkiego w Krakowie przedstawiono w tabeli 3. W otoczeniu lokalizacji punktów pomiarowych występuje zabudowa wielopiętrowa (budynki mieszkalne jak i budynki użyteczności publicznej), stąd dwa z 10 próbników zostały powieszone na wyższej wysokości (10 i 16 m n.p.t.) – na balkonach najbliższego budynku mieszkalnego. Skrzyżowanie ulic Kazimierza Wielkiego i Królewskiej charakteryzuje się stosunkowo dużym natężeniem ruchu samochodowego, szczególnie w godzinach szczytu porannego i popołudniowego, stąd mogło ono w jakimś stopniu wpływać na wyniki przeprowadzonych pomiarów.

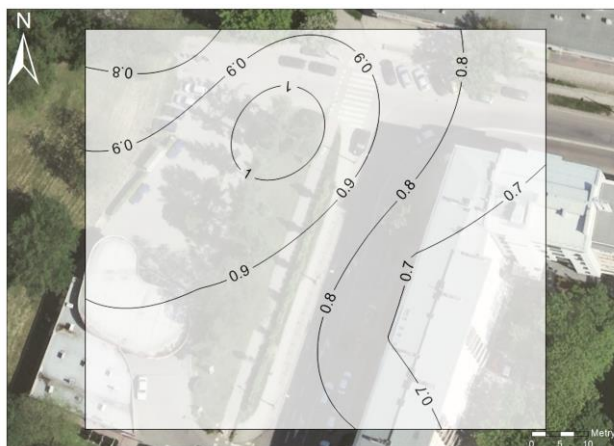
Tabela 3 Średniomiesięczne stężenie benzenu w okolicach stacji paliw przy ul. Kazimierza Wielkiego w Krakowie na przełomie maja i czerwca 2015 roku

Nr punktu	Stężenie benzenu, $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	Nr punktu	Stężenie benzenu, $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
1	0,9	6	0,8
2	0,9	7	0,8
3	0,7	8	0,7
4	1,1	9	0,6
5	0,7	10	0,6

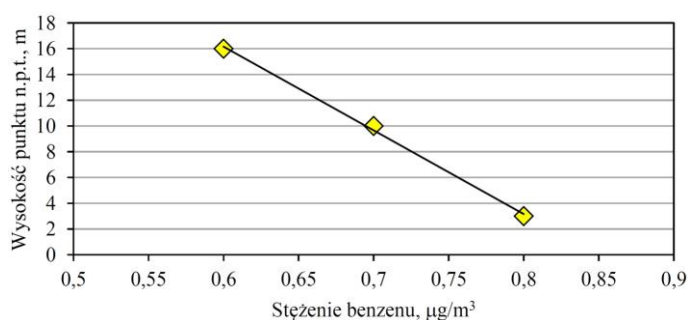
Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 24 sierpnia 2012 r. w sprawie poziomów niektórych substancji w powietrzu [26] nie określa wartości dopuszczalnej dla stężeń 1-miesięcznych benzenu w powietrzu. W związku z powyższym otrzymane wyniki porównano z wartością dopuszczalną odnoszącą się do roku kalendarzowego, która wynosi $5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Uzyskane wartości stężeń, zamieszczone w tabeli 5 są znacznie niższe od tej wartości, co oznacza, że analizowana stacja paliw nie powoduje nadmiernego zanieczyszczenia powietrza benzenem w okresie letnim.

Na rysunku 9 zamieszczono rozkład przestrzenny zarejestrowanych stężeń benzenu w powietrzu. Wynika z niego, że maksymalne wartości tych stężeń wystąpiły w bezpośrednim sąsiedztwie stacji, w tym w pobliżu odpowietrznika podziemnego zbiornika benzyny (punkt nr 4). W analizowanym okresie w rejonie tym przeważały wiatry wiejące z kierunku południowo-zachodniego, co znalazło swoje odzwierciedlenie w przestrzennym rozkładzie stężeń benzenu w powietrzu przedstawionym na rysunku 9. Stężenia te maleją także wraz z wysokością, co zobrazowano na rysunku 10 na przykładzie wyników

pomiarów przeprowadzonych na wysokości 3, 10 i 16 m n.p.t. na wysokości parteru oraz drugiego i czwartego piętra pobliskiego budynku czteropiętrowego.



Rys. 9. Przestrzenny rozkład średnich stężeń benzenu w rejonie stacji paliw przy ul. Kazimierza Wielkiego w Krakowie w analizowanym okresie (maj/czerwiec 2015), $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$



Rys. 10. Zależność pomiędzy stężeniem benzenu a wysokością punktu pomiarowego na elewacji budynku czteropiętrowego zlokalizowanego w bezpośrednim sąsiedztwie stacji paliw

4. Wnioski

Przeprowadzone badania potwierdziły możliwość wykorzystania wyników pomiarów stężeń zanieczyszczeń w powietrzu realizowanych za pomocą próbników pasywnych do oceny przestrzennego zróżnicowania tych stężeń w badanym obszarze, w tym na terenie miast narażonych na oddziaływanie wielu różnych źródeł emisji. Metoda pasywna pozwala w szczególności na określenie zasięgu istotnego wpływu na jakość powietrza głównych źródeł emisji NO_2 (transport drogowy), SO_2 (procesy spalania zasilanych paliw w sektorze komunalno-bytowym oraz w energetyce zawodowej i przemysłowej)

lub benzenu (m.in. stacje paliw i zakłady stosujące rozpuszczalniki organiczne). W przypadku zastosowania stosunkowo gęstej siatki pomiarowej, możliwe jest także uzyskanie informacji o średnim obszarowym stężeniu danej substancji, co może stanowić podstawę do zoptymalizowania lokalizacji stacji tła miejskiego.

Literatura

- [1] Cichoń D., Hławiczka S.: Epizody wysokich stężeń dwutlenku siarki, pyłu i tlenku węgla w powietrzu Górnośląskiego Okręgu Przemysłowego w latach 1994-2007, *Ochrona Powietrza i Problemy Odpadów*, 44(4), 2010, ss. 133-141.
- [2] Oleniacz R., Bogacki M., Rzesutek M., Kot A.: Meteorologiczne determinanty jakości powietrza w Krakowie, [w:] *Ochrona powietrza w teorii i praktyce. Tom 2* (red. J. Koniecznyński), Wyd. IPIŚ PAN w Zabrze, Zabrze, 2014, ss. 163-178.
- [3] Trzepieczyńska I. i in.: Fizykochemiczna analiza zanieczyszczeń powietrza, Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1997.
- [4] Staszewski T., Kubiesa P., Maławska M.: Wykorzystanie substancji śladowych do oceny zagrożenia środowiska w Bieszczadzkim Parku Narodowym, *Roczniki Bieszczadzkie*, 19, 2011, ss. 273-284.
- [5] Wójcik J., Malzahn E.: Metody fizyczne stosowane w monitoringu zanieczyszczeń powietrza w Puszczy Białowieskiej, *Acta Agrophysica*, 19(2), 2012, ss. 449-458.
- [6] Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska w Krakowie: Sprawozdanie z badań zanieczyszczenia powietrza metodą wskaźnikową w zakresie NO₂ i SO₂ w ramach monitoringu regionalnego w 2010 roku, Nowy Sącz, 2011.
- [7] Kozak J., Miczyński J., Jurkiewicz T.: Ocena stanu zanieczyszczenia w Krościenku nad Dunajcem, *Pieniny - Przyroda i Człowiek*, 7, 2002, ss. 23-30.
- [8] Olszowski T.: Distributions of SO₂ and NO₂ concentration within administrative borders of Opole, *Polish Journal of Environmental Studies*, 16(3B), 2007, ss. 371-375.
- [9] Kozak J., Suryło. P.: Przestrzenna zmienność stężenia ditlenku siarki na obszarze Bielska-Białej, *Proceedings of ECOpole*, 8(2), 2014, ss. 535-540.
- [10] Albej N.: Monitoring of pollution in the atmosphere by motor vehicle exhaust in territories with objects of historical value, 11th International Conference EURO-ECO 2006 on Interdisciplinary Co-operation for the Sustainable Development of Historical Cities and Protected Areas, Kraków, 2006.
- [11] Śliwka M., Albej N., Borkowska K., Olek M.: Skażenia transportowe niszczą zabytki Krakowa, *Environment & Development*, 63(8), Beirut, 2003.
- [12] Lesiuk A.: Wpływ lokalizacji oraz natężenia ruchu na poziom emisji NO₂ na wybranych skrzyżowaniach w Lublinie, [w:] *Aktualne problemy w ochronie powietrza atmosferycznego* (red. A. Musialik-Piotrowska, J.D. Rutkowski), Wyd. PZITS nr 880, Wrocław, 2008, ss. 105-108.
- [13] Żak M.: Poziome i pionowe profile stężeń dwutlenku azotu w sąsiedztwie szlaków komunikacyjnych, *Ochrona Powietrza i Problemy Odpadów*, 45(1), 2011, ss. 11-25.
- [14] Cortés J. et al.: Environmental variation of PCDD/Fs and dl-PCBs in two tropical Andean Colombian cities using passive samplers, *Science of the Total Environment*, 2015, <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.094>.
- [15] Cox R.M.: The use of passive sampling to monitor forest exposure to O₃, NO₂ and SO₂: a review and some case studies, *Environmental Pollution*, 126(3), 2003, ss. 301-311.
- [16] Klánová J. et al.: Passive air sampler as a tool for long-term air pollution monitoring: Part 1. Performance assessment for seasonal and spatial variations, *Environmental Pollution* 144(2), 2006, ss. 393-405.

- [17] Krupa S.V., Legge A.H.: Passive sampling of ambient, gaseous air pollutants: an assessment from an ecological perspective, *Environmental Pollution*, 107(1), 2000, ss. 31-45.
- [18] Namieśnik J. et al.: Passive sampling and/or extraction techniques in environmental analysis: a review, *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 381(2), 2005, ss. 279-301.
- [19] Olszowski T., Tomaszewska B., Góralna-Włodarczyk K.: Air quality in non-industrialised area in the typical Polish countryside based on measurements of selected pollutants in immission and deposition phase, *Atmospheric Environment*, 50, 2012, ss. 139-147.
- [20] Pienaar J.J. et al.: Passive Diffusion Sampling Devices for Monitoring Ambient Air Concentrations, *Comprehensive Analytical Chemistry*, 70, 2015, ss. 13-52.
- [21] Schuster J.K. et al.: Assessing polychlorinated dibenzo-p-dioxins and polychlorinated dibenzofurans in air across Latin American countries using polyurethane foam disk passive air samplers. *Environmental Science & Technology*, 49(6), 2015, ss. 3680-3686.
- [22] Polska Norma PN-89/Z-04092/08, Oznaczenie dwutlenku azotu w powietrzu atmosferycznym (imisja) metodą spektrofotometryczną z pasywnym pobieraniem.
- [23] Kalina A.: Oznaczenie NO₂ i SO₂ w powietrzu atmosferycznym metodą pasywną, Zakład Chemii Analitycznej, Politechnika Krakowska, Kraków, 2001.
- [24] Krochmal D., Kalina A.: A method of nitrogen dioxide and sulfur dioxide determination in ambient air by use of passive samplers and ion chromatography, *Atmospheric Environment*, 31(20), 1997, ss. 3473-3479.
- [25] Śnieżek T., Degórska A.: Pasywna metoda pomiaru wybranych zanieczyszczeń powietrza na potrzeby oceny jakości powietrza w Polsce, *Monitoring Środowiska Przyrodniczego*, 2009, nr 10, ss. 19-27.
- [26] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 24 sierpnia 2012 r. w sprawie poziomów niektórych substancji w powietrzu, Dz. U. 2012, poz. 1031.
- [27] Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska w Krakowie: System monitoring jakości powietrza, <http://monitoring.krakow.pios.gov.pl/> (dostęp: 31.03.2016).

AN EXAMPLE USING THE PASSIVE SAMPLERS TO ESTIMATION OF THE SPATIAL DIVERSITY OF POLLUTANT CONCENTRATIONS IN URBAN AIR

Summary: The paper presents the estimation of the spatial differentiation of selected gaseous pollutant concentrations in urban air using measurement results performed with the passive method. The research was conducted in the city of Sucha Beskidzka in the winter season (2014/2015) and in the city of Krakow in the summer season (2015). Analysis comprised three major air pollutants for which it was possible to use the passive samplers – nitrogen dioxide (NO₂), sulfur dioxide (SO₂), and additionally benzene. Exposure time of passive samplers lasted one month. In Sucha Beskidzka and Krakow respectively two and three measurement series of NO₂ and SO₂ concentrations were carried out (12 measurement points). Measurement of benzene concentrations was performed only in Krakow at 10 points located in the region of one fuel station. Based on the measurement results, maps of spatial distribution of air pollutant concentrations were created using the ArcGIS software and a discussion related to the obtained variability in the concentrations was conducted.

Key words: air quality; concentration measurements; NO₂; SO₂; benzene; passive method