

Ocena jakości powietrza wewnątrz budynku szkolnego. Studium przypadku z Wrocławia

Evaluation of air quality inside a school building. A case study from Wrocław, Poland

Zwoździak Anna^{1(a, b, c)}, Zwoździak Jerzy^{2 (a)}, Sówka Izabela^{1 (c)}

¹ Politechnika Wroclawska, Wydział inżynierii Środowiska. Dziekan: dr hab. inż. J. Danielewicz, prof. PWR

² Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Państwowy Instytut Badawczy. Dyrektor: dr inż. P. Łagodzki

^(a) redakcja pracy

^(b) obliczenia

^(c) udział w badaniach

STRESZCZENIE

W celu osiągnięcia dobrej jakości powietrza w szkole, gdzie dzieci spędzają ok. 6–8 godzin dziennie i znalezienia rozwiązania, by ją poprawić, należy dokładnie rozpoznać problem zanieczyszczenia powietrza wewnętrznego. Dzieci są jedną z bardziej wrażliwych grup, wśród których obserwuje się szkodliwe oddziaływanie pyłów zawieszonych na zdrowie. Nasze badania skupiły się na charakterystyce zanieczyszczenia powietrza różnymi frakcjami pyłu zawieszonego (tj. PM_{1,0}, PM_{2,5}, PM₁₀) wewnątrz (W) i na zewnątrz (Z) budynku szkoły gimnazjalnej w centrum Wrocławia. Do poboru próbek pyłu PM_{1,0}, PM_{2,5} i PM₁₀, w latach 2009/2010, zostały wykorzystane imraktory typu Harvard.

Zimą, w 90 dni pomiarowych, stwierdzono przekroczenia zalecanych przez WHO średnich dobowych stężeń PM₁₀ i PM_{2,5}. Frakcja PM_{2,5} wewnątrz szkoły oraz frakcja PM₁₀, zarówno zimą, jak i latem miały swoje źródła w samej szkole, o czym świadczył stosunek W/Z = 1,2 dla średnich dobowych stężeń PM_{2,5}, i odpowiednio 1,3 (zimą) oraz 2,0 (latem) dla PM₁₀. Jednak, stężenia PM_{2,5} and PM₁₀ w czasie trwania zajęć szkolnych (8-godzinne średnie) były znacznie wyższe (odpowiednio: 2,0 i 2,5-krotnie zimą oraz 4,1 i 5,6-krotnie latem). Stężenia PM₁ były porównywalne wewnątrz i na zewnątrz szkoły.

Choć są to badania wstępne, to jednak powinny zmotywować do dalszych prac skupionych na ocenie relacji między stężeniem pyłów drobnych w szkole a reakcją układu oddechowego dzieci.

Słowa kluczowe: szkoła, powietrze wewnętrzne, PM_{1,0}, PM_{2,5}, PM₁₀

ABSTRACT

In order to achieve good air quality in schools, where children spend ca. 6–8 hours per day, and to find solutions for improving it, indoor pollution has to be accurately evaluated. Children are among the groups most vulnerable to the adverse effects of PM. Our study focuses on the characterization of different fractions of PM (PM_{1,0}, PM_{2,5}, PM₁₀) measured inside and outside the building of a secondary school in Wrocław, Poland, located in the centre of the city. PM_{1,0}, PM_{2,5}, and PM₁₀ samples, from indoor (I) and outdoor (O) air, were collected using Harvard cascade impactors during the years 2009/2010.

The study revealed that on 90% of days in the winter-time, 24h indoor PM_{2,5} and PM₁₀ concentrations were higher than the WHO air quality guidance values for ambient air. The PM_{2,5} fraction found inside the school in winter and the PM₁₀ fraction both in winter and summer resulted mostly from indoor rather than outdoor sources, as shown by the I/O ratio of 1.2 for 24-hour mean of PM_{2,5} and 1.3, and 2.0 for 24-hour mean of PM₁₀ in winter and summer, respectively. However, PM_{2,5} and PM₁₀ concentrations during teaching hours (8-hour mean) were much higher than outdoors (2.0 and 2.5 times in winter and 4.1 and 5.6 times in summer, respectively). PM₁ concentrations reached comparable levels indoors and outdoors.

These data can be considered as preliminary; however, they may act as a stimulus for future studies aiming to estimate the effect of indoor PM concentrations on the respiratory system in schoolchildren.

Keywords: school, indoor air, PM_{1,0}, PM_{2,5}, PM₁₀

WSTĘP

Środowiskowe oddziaływanie pyłów zawieszonych w atmosferze było przedmiotem zainteresowania wielu prac badawczych [m.in. 1–10]. Powszechnie już wiadomo, że pył z aerozolu atmosferycznego o średnicach cząstek poniżej $2,5 \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2,5}$) może osadzać się w dolnych partiach układu oddechowego ze względu, że łatwo penetruje jego górne odcinki. Głęboko osadzony, usuwany jest bardzo powoli, przez co istnieje możliwość uszkodzenia zdrowych komórek układu. Ten fakt zaważył o zastrzeżeniu standardów jakości powietrza w odniesieniu do pyłów zawieszonych [11, 12].

Liczne badania epidemiologiczne wskazują na istnienie zależności pomiędzy rejestrowanymi poziomami zanieczyszczeń powietrza a zaburzeniami czynnościowymi układu oddechowego lub krwionośnego [m.in. 11, 13–15]. W szeregu publikacjach dowodzi się nawet, że istnieje ścisły związek między wzrostem stężenia pyłu PM_{10} czy $\text{PM}_{2,5}$ w atmosferze a wzrostem śmiertelności z powodu chorób układu oddechowego i sercowo-naczyniowego [m.in. 5, 7]. Autorzy w podsumowaniu swojej pracy przeglądowej stwierdzili, że istnieje wiele popartych dowodów na toksyczne oddziaływanie różnych form pyłów na człowieka, jednak wciąż niewiadomo, które cząstki są za to najbardziej odpowiedzialne [3].

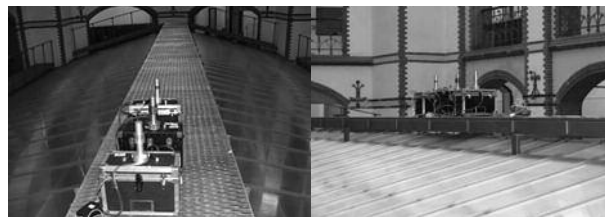
Dzieci spędzają od 6 do 8 godzin w szkole, dlatego też jakość powietrza wewnątrz szkoły może mieć istotny wpływ na zmiany lub zaburzenia czynnościowe układu oddechowego. Uważa się, że jest ona w dużym stopniu zdeterminowana jakością powietrza zewnętrznego oraz samymi źródłami emisji zanieczyszczeń wewnątrz pomieszczeń i skutecznością wentylacji. Poznanie czynników odpowiedzialnych za zwiększone stężenia pyłów w powietrzu wewnętrznym pozwoli na opracowanie efektywnych sposobów ograniczania ich emisji lub eliminowania źródeł.

Celem pracy jest ocena zanieczyszczenia powietrza pyłem zawieszonym o średnicy cząstek poniżej $1 \mu\text{m}$ (PM_1); $2,5 \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2,5}$) i $10 \mu\text{m}$ (PM_{10}) wewnątrz jednej ze szkół gimnazjalnych we Wrocławiu. Badania wpisują się w tematykę projektu SINPHONIE[16], poświęconego Zanieczyszczeniu powietrza w szkołach a zdrowie: sieć obserwacyjna w Europie.

MATERIAŁ I METODY

Pobory próbek frakcji pyłu zostały wykonane we Wrocławiu na terenie Gimnazjum nr 13 przy

ul. Reja. Badania przeprowadzono jednocześnie wewnątrz szkoły (Ryc. 1) oraz na dachu budynku (Ryc. 2).



Ryc. 1. Lokalizacja punktu pomiarowego wewnątrz szkoły
Fig. 1. Inside view of the school building and location of the sampling site



Ryc. 2. Lokalizacja punktu pomiarowego na zewnątrz szkoły

Fig. 2. Location of the sampling site outside the building

Badania prowadzono w cyklach 5-dniowych w grudniu 2009, styczniu 2010 oraz kwietniu, maju i we wrześniu 2010 roku. Do poboru próbek pyłu zawieszzonego PM_1 , $\text{PM}_{2,5}$ i PM_{10} zostały wykorzystane impaktory typu Harvard (MS&T Area Samplers, Air Diagnostics and Engineering, Inc., Harrison, ME, USA). Przepływ powietrza wymuszały ultra-ciche bezolejowe pompy próżniowe (Air Diagnostics and Engineering, air sampling pump, model SP-280E). Natężenie przepływu przy poborze cząstek $<1,0 \mu\text{m}$ wynosiło $23 \text{ dm}^3 \text{ min}^{-1}$, natomiast w przypadku cząstek $<0,25 \mu\text{m}$ i $<10 \mu\text{m}$ – $10 \text{ dm}^3 \text{ min}^{-1}$. Natężenie przepływu było regulowane adapterem kalibracyjnym przed i po pomiarze. Dodatkowo objętość powietrza była kontrolowana przepływomierzem typu Actaris Gallus 2000 Gas Meter. Czas poboru prób wynosił 8 h (8:00–16:00) i 16 h (16:00– 8:00). Jako podłoża zastosowano membrany teflonowe (Anderson Teflon Membrane Filters, 37 mm średnica filtru, $2 \mu\text{m}$ średnica porów).

Stężenia poszczególnych frakcji pyłu zawieszonego były oznaczane grawimetrycznie z użyciem elektronicznej mikrowagi (Sartorius 000 V001) o rozdzielczości 1 g. Analiza została przeprowadzona zgodnie z europejskim standardem oznaczeń pyłu zawieszzonego (NBN-EN-12341). Przed ważeniem filtry były kondycjonowane przez 48 h, w temperaturze 20°C .

Poziomy stężenie pyłów PM1, PM2,5 i PM10 rejestrowane w okresach sesji pomiarowych wprowadzono do arkusza kalkulacyjnego Excel, a następnie analizowano przy użyciu programu komputerowego STATISTICA PL (wersja 9). Analiza statystyczna obejmowała: statystykę opisową: określenie wartości maksymalnych, minimalnych, średnich i odchyłeń standardowych, median i percentyli (25% i 75%) dla poszczególnych zmiennych ilościowych. Wykorzystano również testy t-Studenta istotności różnic dla prób niezależnych (niepowiązanych) oraz badano współzależności dwóch cech przy pomocy analizy korelacji Pearsona dla

cech o rozkładzie normalnym lub przy pomocy testu nieparametrycznego korelacji Spearmana w przypadku, gdy rozkład próby różnił się statystycznie od rozkładu normalnego. Jako poziom istotności przyjęto $p=0,05$.

WYNIKI BADAŃ

W tabelach 1 i 2 zestawiono wyniki średnich dobowych stężeń pyłów PM1, PM2,5 i PM10 wewnątrz i na zewnątrz szkoły dla dwóch badawczych okresów: zimy i wiosny/lata (lato).

Tabela I. Podsumowanie wyników dobowych stężeń pyłów PM1, PM2,5 i PM10 wewnątrz i na zewnątrz szkoły dla dwóch badawczych okresów (zimą $n=14$, latem, $n=15$). Wartości wyrażone są w $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Table I. Summary of indoor/outdoor 24 h mean mass concentrations of PM1, PM2,5, and PM10 for winter ($n=14$) and summer ($n=15$) seasons (in $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

	Wewnątrz				Zewnątrz			
	średnia	odch.std.	min	max	średnia	odch.std.	min	max
<i>Zima</i>								
PM1	21,2	5,3	12,8	33,4	25,5	7,8	16,4	40,7
PM2,5	59,8	21,6	18,2	86,6	49,1	15,6	24,4	67,7
PM10	68,5	21,8	21,6	93,1	56,8	17,3	26,2	88,5
<i>Lato</i>								
PM1	8,5	3,6	4,2	11,6	8,9	3,4	3,7	13,2
PM2,5	13,5	4,1	8,9	18,8	16,0	9,1	8,0	21,6
PM10	43,1	17,9	12,6	68,4	24,7	10,5	11,6	46,6

Tabela II. Percentyle wyznaczone dla dobowych stężeń pyłów PM1, PM2,5 i PM10 wewnątrz i na zewnątrz szkoły dla dwóch badawczych okresów. Wartości wyrażone są w $\mu\text{g}/\text{m}^3$

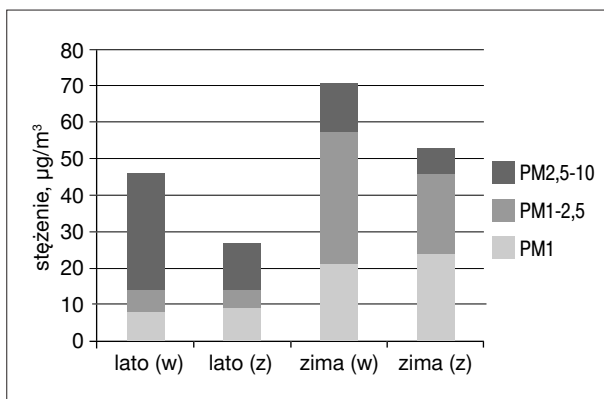
Table II. Percentiles for indoor/outdoor 24 h mean mass concentrations of PM1, PM2,5, and PM10 for two seasons (in $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

	Wewnątrz			Zewnątrz		
	25% perc.*	50% perc.	75% perc.	25% perc.	50% perc.	75% perc.
<i>Zima</i>						
PM1	18,9	19,9	22,4	20,6	22,3	32,5
PM2,5	41,1	65,4	70,0	39,0	49,3	58,0
PM10	62,2	71,1	88,0	49,8	59,2	62,7
<i>Lato</i>						
PM1	6,0	9,2	10,3	5,9	9,3	10,8
PM2,5	10,0	13,9	15,9	10,8	13,1	18,0
PM10	29,9	47,2	56,4	15,6	22,2	32,8

* Perc. – Percentyl

Średnie dobowe stężenia PM₁, PM_{2,5} i PM₁₀ wewnątrz szkoły wynosiły zimą: 21,2, 59,8 i 68,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, podczas gdy w tym samym czasie na zewnątrz wynosiły: 25,5, 49,1 i 56,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Nie stwierdzono statystycznie istotnych różnic w średnich stężeniach pyłów w szkole i na zewnątrz (test t-Studenta, $p>0,05$). Latem rejestrowano znacznie niższe stężenia zarówno wewnątrz, jak i na zewnątrz szkoły i tylko w przypadku stężeń średnich dobowych PM₁₀ stwierdzono statystycznie istotne różnice w średnich wartościach ($p<0,05$). W tym sezonie odnotowano także mniejszą zmienność stężeń niż w sezonie zimowym; odchylenie standardowe w powietrzu zewnętrznym w sezonie letnim wynosiło 3,4, 9,1 i 10,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, odpowiednio dla PM₁, PM_{2,5} i PM₁₀ (zimowym – 10, 16,8 i 17,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), natomiast w powietrzu wewnętrznym 3,6, 4,1 i 17,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (zimowym – 5,3, 21,6 i 21,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Latem PM₁ stanowiło średnio 64% ($64\pm 26\%$) frakcji PM_{2,5} wewnątrz pomieszczeń, natomiast frakcja PM_{2,5} stanowiła 42% ($42\pm 33\%$) frakcji PM₁₀. Wynika z tego, że pył zawieszony był wzbogacony latem we frakcję PM_{2,5-10} (tj. o średnicy większej niż 2,5 μm i mniejszej niż 10 μm) w powietrzu szkolnym (Ryc. 3). Z kolei zimą dominowała frakcja PM_{2,5} stanowiąc średnio 81% ($81\pm 18\%$) frakcji PM₁₀, PM₁ stanowiła 43% ($43\pm 20\%$) frakcji PM_{2,5}. Pył zawieszony wzbogacony był we frakcję PM_{1-2,5} (tj. o średnicy większej niż 1 μm i mniejszej niż 2,5 μm). Wyraźniej te tendencje rysują się dla stężeń 8-godzinnych, tj. w okresie przebywania dzieci w szkole (Ryc. 4).

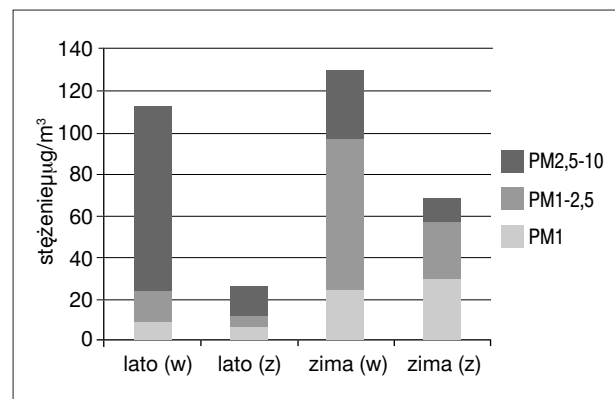


Ryc. 3. Średnie dobowe stężenia frakcji pyłu PM₁, PM_{1-2,5}, PM_{2,5-10} w całkowitym stężeniu pyłu zawieszonego PM₁₀ (w – wewnątrz szkoły, z – na zewnątrz szkoły)

Fig. 3. 24-h mean concentrations of PM₁, PM_{1-2.5}, and PM_{2.5-10} fractions in PM₁₀ concentrations (w – inside school, z – outside school)

Aby ocenić wysokość stężeń należy porównać rejestrowane poziomy z obowiązującymi normami lub innymi publikowanymi danymi. Polskie i europejskie normy dopuszczalne dla PM_{2,5} w powietrzu zewnętrznym odnoszą się do wartości średnich rocznych (25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), natomiast dla pyłu PM₁₀ zarówno do wartości średnich rocznych (40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), jak i średnich dobowych (50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, dopuszczalna liczba przekroczeń – 35 dni). Standardy WHO są znacznie ostrzejsze. Zalecane stężenie roczne PM₁₀ wynosi 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{2,5} – 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, natomiast 24 godzinne stężenie PM_{2,5} i PM₁₀, odpowiednio – 25 i 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. W przypadku powietrza wewnętrznego brak jest unormowań prawnych, za wyjątkiem stanowisk pracy. Odnosząc się do norm WHO [11] dla powietrza zewnętrznego oraz akceptując zalecenia Grupy Sterującej, aby stosować te same normy dla powietrza wewnątrz pomieszczeń, wynika, że stężenia zalecane średnie dobowe PM₁₀ i PM_{2,5} były często przekraczane w szkole zimą (powyżej 90% przypadków). W sezonie letnim stężenia były zdecydowanie niższe i spełniały zalecenia WHO.

Przyglądając się danym zamieszczonym na Ryc. 3 i 4 wynika, że stężenia PM_{1-2,5} były wyraźnie wyższe zimą wewnątrz szkoły niż na zewnątrz, z kolei latem stężenia PM_{2,5-10} były wyższe w powietrzu wewnętrznym. W przypadku stężeń pyłów PM₁ stwierdzono porównywalne poziomy latem wewnątrz i na zewnątrz, i nieznacznie wyższe zimą w powietrzu zewnętrznym. Wyniki te zostały potwierdzone testem statystycznym dla prób niezależnych ($p>0,05$). Stwierdzono brak istotnej różnicy między średnimi stężeniami PM₁ w powietrzu wewnątrz szkoły i na zewnątrz.



Ryc. 4. Średnie stężenia 8-godzinne (godziny lekcyjne) frakcji pyłu PM₁, PM_{1-2,5}, PM_{2,5-10} w całkowitym stężeniu pyłu zawieszonego PM₁₀ (w – wewnątrz szkoły, z – na zewnątrz szkoły)

Fig. 4. 8-h mean (teaching hours) concentrations of PM₁, PM_{1-2.5}, and PM_{2.5-10} fractions in PM₁₀ concentrations (w – inside school, z – outside school)

Dla wyrażenia różnic w stężeniach poszczególnych frakcji pyłów wyliczono średnie stosunki stężeń W/Z dla stężeń średnich dobowych oraz dla stężeń rejestrowanych w godzinach lekcyjnych (dzień) i poza lekcyjnych (noc). W obecnych badaniach ten stosunek dla stężeń średnich dobowych zmieniał się w granicach 0,8–1,3 zimą i 1,0–2,0 latem (Tab. III). Potwierdza to obecność źródeł pyłów wewnątrz szkoły, szczególnie dla pyłów PM_{2,5} i PM₁₀ w okresie przebywania dzieci w szkole (Tab. III, dzień). W przypadku pyłów PM₁ stosunek W/Z kształtował się średnio na poziomie 0,8 zimą i 1,0 latem i mieścił się w zakresie opisanym w literaturze, tj. 0,14–1,37 dla cząstek o średnicy 0,5 i 1,5 μm [9]. Odwołując się do badań modelowych [17], wynika, że teoretyczny stosunek W/Z dla PM_{2,5} w typowym domu, bez wyraźnych źródeł wewnętrznych pyłów, kształtuje się na poziomie 0,4–0,6. Badania przeprowadzone w kilkunastu pomieszczeniach biurowych w Belgii [18] wykazały, że przy braku wentylacji stosunek W/Z wynosił 0,6 dla pyłu zawieszonego, zmniejszył się w pomieszczeniach z mechaniczną wentylacją do 0,47, a w przypadku dodatkowo zainstalowanych urządzeń filtracyjnych do 0,28. W pracy przeglądowej autorzy [9] przytaczają wyniki 77 badań, z tego, w ponad połowie, stwierdzono stosunek W/Z poniżej 1,0 zarówno dla PM_{2,5} i PM₁₀. Uważa się, że wyższy stosunek świadczy o wpływie źródeł pyłu wewnątrz pomieszczeń [9, 19]. Badania przeprowadzone w ramach projektu SINPHONIE [16] wykazały, że stosunek W/Z dla PM_{2,5} wyniósł średnio 1,4 w okresie grzewczym i 1,9 w okresie poza grzewczym. W naszych badaniach, stosunek W/Z dla PM_{2,5} (Tab. III, doba) kształtował się na podobnym poziomie w okresie grzewczym (1,2±0,3), natomiast w okresie poza grzewczym był niższy (1,0±0,5). Latem wyższy stosunek W/Z zarejestrowano dla pyłu PM₁₀ (2,0±1,0).

Tabela III. Stosunek stężeń PM₁, PM_{2,5} i PM₁₀ w powietrzu wewnętrznym (W) do jednocześnie mierzonych stężeń na zewnątrz (Z)

Table III. Summary of indoor/outdoor mass concentration ratios (W/Z) for PM₁, PM_{2,5} and PM₁₀

W/Z					
Zima			Lato		
PM ₁	PM _{2,5}	PM ₁₀	PM ₁	PM _{2,5}	PM ₁₀
doba					
0,8 ±0,1	1,2±0,3	1,3±0,5	1,0±0,3	1,0±0,5	2,0±1,0
dzień					
0,8±0,2	2,0±0,8	2,5±1,7	1,3±0,4	4,1±2,9	5,6±2,9
noc					
0,9±0,1	0,8±0,1	0,8±0,0	0,8±0,1	0,7±0,1	1±0,3

Na stosunek W/Z wpływa wiele procesów, np. wentylacja naturalna i mechaniczna, infiltracja i penetracja oraz szybkość depozycji zanieczyszczeń. Infiltracja jest niekontrolowanym ruchem powietrza wywołanym nieszczelnościami w obudowie domu. W odróżnieniu, wentylacja jest zamierzonym ruchem powietrza, spowodowanym przez odpowiednie rozwiązania budowlane (grawitacyjna) czy instalacyjne (wymuszona). Zjawiska wentylacji i infiltracji występują jednocześnie w budynkach. Penetracja powietrza oznacza z kolei przedostawanie się zimnego powietrza do wnętrza pomieszczenia np. spod okien czy drzwi, co potocznie kojarzy się z przeciągiem. Zjawiska te można modelować wykorzystując równanie zachowania masy w odniesieniu do pomieszczenia o danej objętości. Jednak rozwiązanie uzyskuje się dla konkretnych obiektów i wyniki trudno jest odnieść do obecnego budynku szkoły. Aby wyznaczyć współczynniki infiltracji, penetracji i usuwania zanieczyszczeń należałoby przeprowadzić dodatkowe pomiary, które wykraczały poza zakres obecnych badań.

DYSKUSJA

Badania nasze potwierdziły, że zimą rejestrowano znacznie wyższe stężenia pyłów zarówno wewnątrz, jak i na zewnątrz szkoły niż latem. Wyniki sugerują istnienie wewnątrz szkoły źródeł emisji pyłów w zakresie średnic od 1 do 10 μm. Zimą w szkole generowany jest aerozol o średnicach w zakresie od 1 do 2,5 μm. Średnie stężenie frakcji PM_{1–2,5} wewnątrz szkoły, w godzinach lekcyjnych, wynosiło 72 μg/m³, na zewnątrz ok. 26 μg/m³ (Ryc. 4.). Natomiast latem przeważała frakcja w zakresie od 2,5 do 10 μm, (średnie stężenie wewnątrz szkoły 88 μg/m³, na zewnątrz 15 μg/m³).

Zanieczyszczenie powietrza wewnętrznego może być bardzo różne, zależnie od istniejących źródeł emisji pyłów w pomieszczeniach oraz wentylacji pomieszczeń. W badaniach, przeprowadzonych we Francji w Clermont-Ferrand, stężenia pyłu PM_{2,5} wewnątrz pomieszczeń zmieniały się w granicach od 3,3 do 265,1 μg/m³ zimą i odpowiednio latem: 5,0–80,3 μg/m³ [20]. Z kolei zmierzone stężenia PM₁₀ w 79 klasach w szkołach Monachium (w czasie trwania lekcji) w okresie zimy mieściły się w zakresie od 16 do 313 μg/m³ i latem od 3 do 81 μg/m³, a w przypadku PM_{2,5}, odpowiednio: 18–178 μg/m³ i 5–35 μg/m³ [21]. W innych badaniach [22], prowadzonych w ciągu 6-tygodniowej sesji pomiarowej (październik–listopad 2006) w 2 klasach, stężenia PM_{2,5} zmieniały się, w czasie trwania lekcji, od 19

do $106 \mu\text{g}/\text{m}^3$, natomiast stężenia PM_{10} , odpowiednio od 58 do $210 \mu\text{g}/\text{m}^3$. W naszych badaniach, w okresie zimy (grudzień–styczeń), notowano porównywalne stężenia w ciągu dnia, w zakresie od 59 do $143 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dla $\text{PM}_{2,5}$ i od 94 do $146 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dla PM_{10} . Stężenia średnie dobowe były o połowę niższe (Tab. I.). Podobne zależności zanotowano w trzech szkołach Holandii [23], stężenia PM_{10} były dwukrotnie wyższe w okresie zajęć szkolnych niż średnie 24 godzinne. Z kolei, w pilotowych badaniach przeprowadzonych w pomieszczeniach klasowych w Belgii [24], 12 godzinne stężenie PM_{10} w ciągu dnia przewyższało o 40% stężenie średnie dobowe. Pomiaru stężeń średnich dobowych, przeprowadzone w szkołach w 25 krajach europejskich, w ramach projektu SINPHONIE [16], potwierdziły bardzo duże zróżnicowanie stężeń $\text{PM}_{2,5}$ między poszczególnymi krajami. Stężenia zmieniały się w granicach $3,6\text{--}250 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Istotnie wyższe rejestrowano w południowej i centralnej Europie w porównaniu do północnej i zachodniej.

Czy jesteśmy w stanie przypisać pewne zmiany w normalnym funkcjonowaniu dzieci ekspozycją na zanieczyszczenia w samej szkole? Dużą część czasu w ciągu dnia dzieci spędzają w szkole, ale również w domu. Czytelność obrazu komplikuje dodatkowo zróżnicowana aktywność fizyczna dzieci w ciągu dnia. Ciekawe jest, że badania potwierdziły niezależne reakcje organizmów dzieci na ekspozycję na zanieczyszczenia w domu i w szkole [25, 26], co skłania do prowadzenia badań nie tylko w pomieszczeniach domowych. Przyczyn może być wiele, m.in. różnice w poziomie stężeń i ich dozie, rodzaju zanieczyszczeń, aktywności fizycznej dzieci. Zgodnie z badaniami [27, 28], stosunek W/Z dla $\text{PM}_{2,5}$ jest wyższy w pomieszczeniach szkolnych niż domowych, co oznacza, że szkoły mają większy udział w dobowej ekspozycji dzieci na pył drobny niż domy.

W pracy [29] dokonano obszernego przeglądu prac pod kątem metodologii ocen oddziaływania zanieczyszczeń powietrza na zdrowie dzieci szkolnych (zbieranie danych, analizy, efekty zdrowotne). Skoncentrowano się na dostępnych w literaturze badaniach epidemiologicznych i jakości powietrza. Badania epidemiologiczne dotyczyły wpływu czynników środowiskowych, w tym przypadku zanieczyszczeń powietrza wewnętrznego w szkole, na stan zdrowia dzieci. Badania jakości powietrza obejmowały poziomy stężenie zanieczyszczeń wewnątrz i na zewnątrz szkoły. Autorzy stwierdzili, że niewiele jest prac opisujących jednocześnie warunki panujące w szkole i na zewnątrz szkół, większość badań epidemiologicznych jest odnoszona do pomiarów stę-

żeń zanieczyszczeń powietrza wykonywanych na stacjach monitoringu atmosfery, niekiedy odległych od szkoły. Ponadto, w wielu pracach wykorzystuje się stężenia uśredniane do doby, a nie dotyczą godzin szkolnych, kiedy dzieci bezpośrednio ekspozowane są na działanie czynników środowiskowych. W niektórych badaniach wykorzystywano wyniki jakości powietrza uzyskane z modeli transportu i rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń, a nie dane pomiarowe. Zwrócono uwagę, że nie zawsze lokalizacja stacji pomiarowej była reprezentatywna dla ekspozycji dzieci w szkole na oddziaływanie zanieczyszczeń powietrza [28]. Czyli najbardziej odpowiednie są badania in situ, przeprowadzane jednocześnie wewnątrz i na zewnątrz szkoły w godzinach przebywania dzieci w szkole. Wiadomo, że stężenia pyłów mogą zmieniać się w poszczególnych klasach i są zależne m.in. od aktywności dzieci. W świetle tych rozważań można uznać, że przyjęta w obecnych badaniach metodologia była słuszna. Pomiaru prowadzono w cyklach tygodniowych w czasie trwania roku szkolnego 2009/2010 jednocześnie wewnątrz budynku szkoły i na zewnątrz. Wprawdzie pomiary wewnątrz szkoły przeprowadzono w jej holu, a nie w klasach, ale miało to swoje uzasadnienie. Ze względu na dużą kubaturę budynku i istnienie patio (kryte dachem szklanym), „wietrzenie” klas w czasie przerw odbywa się zazwyczaj poprzez otwieranie drzwi, a nie okien, co stwarza możliwość wymiany powietrza hol-klasa, a nie klasa-powietrze zewnętrzne. Ponadto, w ramach obecnego projektu, pomiary spirometryczne u dzieci prowadzone były w sali, mającej bezpośredni kontakt z powietrzem holu. Z kolei pomiary stężeń pyłów w powietrzu zewnętrznym wykonywane były na granicy warstwy dachowej, rozciągającej się od powierzchni ziemi do dachów i wierzchołków drzew, do której emitowane są głównie zanieczyszczenia pochodzące z motoryzacji i palenisk domowych. Powietrze z tej warstwy dobrze charakteryzuje jakość powietrza infiltrującego i penetrującego do wewnątrz budynku szkoły.

W jaki sposób zanieczyszczenia z zewnątrz mogą przedostawać się do szkoły? Przede wszystkim drogą naturalnej wentylacji oraz infiltracji przez nieszczelności w budynku, co w przypadku analizowanej szkoły może mieć miejsce. Budynek jest stary, wybudowany został na początku ubiegłego wieku. Cząstki infiltrując do środka budynku pozostają zawieszone i w warunkach ustalonych (stała szybkość infiltracji i depozycji zanieczyszczeń), przy braku źródeł wewnątrz szkoły ustala się równowaga, którą można wyrazić za pomocą liniowej funkcji regresji. Tę prostą zależność, wyznaczającą współczynnik in-

filtracji, wykorzystywano w pracy [30]. Z przeprowadzonej, dla obecnej szkoły, analizy wynika, że w przypadku pyłu PM1 współczynnik infiltracji był bardzo podobny latem i zimą, odpowiednio 0,65 i 0,68. W przypadku pyłów PM10 i PM2,5 nie stwierdzono istotnej korelacji między stężeniami wewnątrz i na zewnątrz szkoły (wsp. korelacji Pearsona $r < 0,5$, $p > 0,05$), co wynikało z istnienia źródeł tych frakcji pyłów w samej szkole.

Na pewno badania te należy kontynuować i wydłużyć okres badawczy celem zebrania bardziej reprezentatywnego zbioru danych. Ponadto, w przyszłych badaniach należy uwzględnić szybkość wymiany powietrza w szkole oraz ocenić działanie systemu wentylacji w szkole, zwłaszcza w trakcie przebywania dzieci w szkole.

WNIOSKI

1. Wyniki badań jednoznacznie wskazują na istniejący problem wysokich stężeń pyłów drobnych wewnątrz szkoły, przekraczających zalecane przez WHO poziomy stężeń PM2,5 i PM10.
2. Dzieci poddane są znacznie większej ekspozycji na pył zawieszony w szkole niż przebywając na tzw. dworze. Rejestrowano kilkukrotnie wyższe stężenia pyłów w powietrzu wewnątrz, w okresie przebywania dzieci w szkole, niż w tym samym czasie na zewnątrz.
3. Stężenie PM2,5 wewnątrz szkoły determinowane było częściową infiltracją z zewnątrz. Była to głównie frakcja PM1, stanowiąca latem ok. 64%, a zimą ok. 43% pyłu PM2,5 wewnątrz szkoły, pozostała część pyłu pochodziła ze źródeł wewnątrz samej szkoły (frakcja PM1-10).
4. Stwierdzono, że zimą w szkole generowany jest aerozol przede wszystkim o średnicach w zakresie od 1 do 2,5 μm , PM1-2,5, natomiast latem w zakresie od 2,5 do 10 μm , PM2,5-10.
5. Wyniki pracy dowodzą pilnej konieczności kontynuacji tego typu badań, zarówno pod kątem monitorowania stężeń pyłów drobnych w szkołach, jak i zagrożenia zaburzenia funkcjonowania układu oddechowego dzieci z powodu wysokich stężeń pyłu.
6. Jako bieżące działanie zaleca się zwiększenie wymiany powietrza wewnątrz szkoły w czasie przebywania dzieci w szkole.

Praca została sfinansowana ze środków Narodowego Centrum Nauki w ramach projektu nr N304 067937 pt. Identyfikacja wpływu zanieczyszczenia powietrza na funkcje układu oddechowego u dzieci w wieku szkolnym.

WYKAZ PIŚMIENICTWA

- [1] Pope C.A., Burnett R.T., Thun M.J. i wsp.: Lung cancer, cardiopulmonary mortality and long-term exposure to fine particulate air pollution. *JAMA* 2002; 287: 1132-1141.
- [2] Rabczenko D., Wojtyniak B., Wysocki M. i wsp.: Krótkookresowy wpływ zanieczyszczeń powietrza atmosferycznego dwutlenkiem siarki, pyłami zawieszonymi i dwutlenkiem azotu na umieralność mieszkańców miast w Polsce. *Przeegl Epidemiol* 2005; 59: 969-979.
- [3] Grahame T.J., Schlesinger R.B.: Evaluating the health risk from secondary sulfates in Eastern North American regional ambient air particulate matter. *Inhal Toxicol* 2005; 17, 15-27.
- [4] Ebel, S.T., Wilson, E.W., Brauer, M.: Exposure to ambient and nonambient components of particulate matter: a comparison of health effects. *Epidemiology* 2005; 16: 396-405.
- [5] Neuberger M., Rabczenko D., Moshhammer H.: Extended effects of air pollution on cardiopulmonary mortality in Vienna. *Atmos Environ* 2007; 41: 8549-8556.
- [6] WHO: Indoor air Pollution and Lower Respiratory Tract Infections in Children, Geneva 2007a, Switzerland.
- [7] Liang W.M., Wei H.Y., Kuo H.W.: Association between daily mortality from respiratory and cardiovascular diseases and air pollution in Taiwan. *Environ Res* 2009; 109: 51-58.
- [8] Ashmore M.R., Dimitroulopoulou C.: Personal exposure of children to air pollution. *Atmos Environ* 2009; 43:128-141.
- [9] Chen, C., Zhao, B.: Review of relationship between indoor and outdoor particles: I/O ratio, infiltration factor and penetration factor. *Atmos Environ* 2011; 45: 275-288.
- [10] Smargiassi A., Goldberg M.S., Wheeler A.J. i wsp.: Association between personal exposure to air pollutants and lung function tests and cardiovascular indices among children with asthma living near an industrial complex and petroleum refineries. *Environ Res* 2014; 132:38-45.
- [11] WHO: Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. Global Update 2005. Geneva 2006.
- [12] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/50/WE z dnia 21 maja 2008 w sprawie jakości powietrza i czystszego powietrza dla Europy, (Dz. Urz. UE L 152 z dnia 11.02.2008).
- [13] Weichenthal, S., Dufresene, A., Infante-Rivard, C.: Indoor ultra-fine particles and childhood asthma: exploring a potential concern. *Indoor Air* 2007;17: 81-91.
- [14] Lin L., Chen H., Su T. i wsp.: The effects of indoor particle exposure on blood pressure and heart rate among young adults: An air filtration-based intervention study. *Atmos Environ* 2011; 45: 5540-5544.
- [15] Li S., Williams G., Jalaludin B. i wsp.: Panel studies of air pollution on children's lung function and respiratory symptoms: A literature review. *J Asthma* 2012; 49: 895-910.
- [16] Tsoobod E., Annesi Maesano I., Carrer P. i wsp.: SINPHONIE School Indoor Pollution & Health Observatory network in Europe; Final report, Luxemburg European Union 2014 doi: 10.2788/99220.
- [17] Wallace, L.A.: Indoor Particles: a review. *J Air Waste Manag Assoc* 1996; 46: 98-127.
- [18] Horemens B., Worobiec A., Buczyńska A. i wsp.: Airborne particulate matter and BTEX in Office environments, *J Environ Monitor* 2008; 10: 867-876.
- [19] Viana M., Diez S., C. Reche C.: Indoor and outdoor sources and infiltration processes of PM1 and black carbon in an urban environment. *Atmos Environ* 2011; 45: 6359-6367.

- [20] Hulin M., Caillaud D., Annesi-Maesano I.: Indoor air pollution and childhood asthma: variations between urban and rural areas, *Indoor Air* 2010; 20: 502-514.
- [21] Fromme H., Twardell D., Dietrich S. i wsp.: Particulate matter in the indoor air of classrooms – exploratory results from Munich and surrounding area. *Atmos Environ* 2007; 41: 854-866.
- [22] Fromme H., Diemer J., Dietrich S. i wsp.: Chemical and morphological properties of particulate matter (PM10, PM2.5) in school classrooms and outdoor air. *Atmos Environ* 2008; 42: 6597-6605.
- [23] Janssen N.A.H., Holk G., Brunekreef B. i wsp.: Mass concentration and elemental composition of PM10 in classrooms. *Occup Environ Med* 1999; 56: 482-487.
- [24] Stranger M., Potgieter-Vermaak S.S., Van Grieken R.: Characterization of indoor air quality in primary schools in Antwerp, Belgium. *Indoor Air* 2008; 18: 454-463.
- [25] McConnell R., Islam T., Shankardass K. i wsp.: Childhood incident asthma and traffic-related air pollution at home and school, *Environ Health Perspect* 2010; 117: 1021-1026.
- [26] Nitschke M., Pilotto L.S., Attewell R.G. i wsp.: A cohort study of indoor nitrogen dioxide and house dust mite exposure in asthmatic children. *J Occup Environ Med* 2006; 48: 462-469.
- [27] Ligman B., Casey M., Braganza E. i wsp.: Airborne particulate matter within school environments in the United States. w: *Proceedings of Indoor Air 1999*, vol. 4. CRC Ltd 255-260.
- [28] Wu J., Lurmann F., Winer A. i wsp.: Development of an individual exposure model for application to the Southern California Children's Health Study. *Atmos Environ* 2005; 39: 259-273.
- [29] Mejia J.F., Low Hoy S., Mengersen K. i wsp.: Methodology for assessing exposure and impacts of air pollutants in school children: Data collection, analysis and health effects – A literature review. *Atmos Environ* 2011; 45: 813-823.
- [30] Zwoździak A., Sówka I., Worobiec A. i wsp.: The contribution of outdoor particulate matter (PM1, PM2.5, PM10) to school indoor environment. *Indoor Built Environ* 05/2014; doi:10.1177/1420326X14534093.

Adres do korespondencji:

*dr inż. Anna Zwoździak
Politechnika Wrocławska
Wydział inżynierii Środowiska Wybrzeże Wyspiańskiego
27, 50-370 Wrocław
e-mail: anna.zwozdzia@pwr.edu.pl,
tel. 71 320 25 00*