

mgr inż. Katarzyna Nowak-Dzieszko<sup>1)</sup>  
ORCID: 0000-0002-5484-7747

# Wpływ stężenia pyłów PM10 oraz PM2,5 w środowisku zewnętrznym na jakość powietrza wewnątrz pomieszczeń

## *Influence of PM10 and PM2.5 concentration in the external environment on the internal air quality*

DOI: 10.15199/33.2024.01.07

**Streszczenie.** W związku z tym, że większość ludzi spędza w pomieszczeniach 80 – 90% czasu, bardzo istotne jest zrozumienie mechanizmu transportu zanieczyszczeń pomiędzy wnętrzem i otoczeniem budynku. Oczekuje się, że skuteczna wymiana powietrza w budynku pozwoli na utrzymanie dobrej jakości powietrza w pomieszczeniu, m.in. przez ograniczenie stężenia dwutlenku węgla, wilgotności powietrza, zanieczyszczenia chemicznego itp. Jednocześnie, w okresach bardzo dużego stężenia pyłów zawieszonych (PM) w atmosferze, zamierzona wymiana powietrza powoduje wzrost stężenia pyłów wewnątrz pomieszczenia. W artykule przeanalizowano wpływ warunków zewnętrznych na jakość powietrza wewnętrznego w dwóch pomieszczeniach edukacyjnych z grawitacyjnym systemem wentylacji. Analiza statystyczna otrzymanych odczytów pozwoliła określić opóźnienie czasowe, po jakim możemy się spodziewać wzrostu stężenia pyłów wewnątrz pomieszczeń. Wniosek ten może być wskazówką do sposobu użytkowania pomieszczeń w okresie podwyższonego poziomu stężenia pyłów zawieszonych.

**Słowa kluczowe:** jakość powietrza wewnętrznego; pyły zawieszone; PM10; PM2,5; indeks I/O.

**Abstract.** Since most of the people spend 80 – 90% of their time indoors, it is important to understand the mechanism of transport of pollutants between the interior and exterior of a building. It is expected that effective ventilation of the building interior will allow maintaining good air quality in the room, among others by limiting the concentration of carbon dioxide, air humidity, chemical pollution, etc. At the same time, during periods of very high PM concentration in the atmosphere, intentional air exchange causes an increase in dust concentration inside the room. The article analyzed the impact of external conditions on the quality of indoor air in two educational rooms with a gravity ventilation system. Statistical analysis of the obtained readings allowed us to determine the time delay after which we can expect an increase in internal concentrations. This conclusion may be an indication of how rooms should be used during periods of increased levels of suspended dust concentrations.

**Keywords:** indoor air quality; suspended dust; PM10; PM2.5; I/O index.

Związek między stężeniem pyłów w pomieszczeniach i na zewnątrz budynku jest bardzo ważny z punktu widzenia użytkowników budynku, szczególnie wtedy, gdy poziom pyłów zawieszonych (PM – *Particulate Matter*) na zewnątrz jest bardzo wysoki. Badania epidemiologiczne wykazują niekorzystny wpływ dużego stężenia pyłów zawieszonych na zdrowie człowieka. Szacuje się, że w skali międzynarodowej PM2,5 odpowiada za ok. 3% śmiertelności z powodu chorób sercowo-płucnych i ok. 5% śmiertelności z powodu raka tchawicy, oskrzeli i płuc [1, 2]. Autorzy pracy [3] opisują negatywny

wpływ większych pyłów, tj. frakcji PM10 na zdrowie.

W nowoczesnych budynkach z wentylacją mechaniczną, wyposażoną w filtry, powietrze dostające się do budynku przez system wentylacyjny jest częściowo oczyszczane. Efekty zastosowania filtrów opisano w [4, 5]. Filtry HEPA lub PFU mogą zmniejszyć wewnętrzne stężenie cząstek nawet o 60%. W budynkach z wentylacją grawitacyjną liczba cząstek transportowanych do wewnątrz jest ściśle związana z infiltracją powietrza przez nieszczelności w obudowie budynku, która warunkuje poprawne działanie tego systemu. Powszechnie stosowanym parametrem opisującym zależność stężenia pyłów wewnątrz i na zewnątrz budynku jest współczynnik I/O (stężenie wewnątrz-

ne/stężenie zewnętrzne), którego wartość różni się znacznie w zależności od szybkości wymiany powietrza w pomieszczeniu oraz źródeł emisji. W wielu krajach, w których zanieczyszczenie pyłami związane jest głównie ze sposobem użytkowania budynku, a jakość powietrza zewnętrznego jest wysoka, ma on wartość większą od 1.

Wyniki badań i analiz zależności I/O zostały opisane w pracach [6 ÷ 8]. W wielu krajach występuje wysoki poziom emisji cząstek stałych wewnątrz budynków, których źródłem jest palenie tytoniu czy spalanie paliw. Wówczas problemem jest mała intensywność wentylacji, gdyż zanieczyszczeń nie da się łatwo usunąć. Autor pracy [9] przeprowadził pomiary w 17 domach w Szwajcarii, gdzie jakość powietrza

<sup>1)</sup> Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Wydział Inżynierii Łądowej; knowak-dzieszko@pk.edu.pl

zewnątrznego jest bardzo dobra i oszacował stosunek I/O. W domach bez źródeł wewnętrznych współczynnik I/O był mniejszy niż 0,7, a w budynkach ze źródłami wewnętrznymi większy niż 1,8. W jednym z przypadków, opisanym w [6], stosunek I/O wyniósł 34. Podobną analizę przeprowadzono w mieszkaniu w Koszycach na Słowacji i wnioski były podobne. Stosunek I/O był największy w kuchni ze względu na wewnętrzne źródła PM [10]. W Krakowie obserwujemy odwrotną zależność. Na zewnątrz budynku poziom zanieczyszczeń jest wysoki, a mikrocząstki przedostają się do wnętrza na skutek wentylacji i infiltracji powietrza. Skuteczna wentylacja budynku z jednej strony pozwala na utrzymanie dobrej jakości powietrza w pomieszczeniu, ponieważ usuwana jest wilgoć oraz dwutlenek węgla generowany metabolicznie przez użytkowników, ale w okresach bardzo dużego stężenia PM w atmosferze, zamierzona wymiana powietrza może powodować zanieczyszczenie wnętrza pyłami zawieszonymi na wysokim poziomie. Wyniki analizy współczynnika I/O w przypadku budynków w Krakowie zostały opisane w [8, 11]. W [11] zaprezentowano wyniki pomiarów oraz analizę zależności stężenia pyłów wewnątrz i na zewnątrz w kilku lokalach mieszkalnych w Krakowie z naturalnym systemem wentylacji. Szczegółnej analizie poddano okresy o dużym stężeniu pyłów na zewnątrz. W każdym przypadku stężenie wewnątrz było mniejsze niż na zewnątrz pomieszczeń (redukcja wartości stężenia wynosiła średnio ok. 50%).

Badania pomieszczeń oraz budynków edukacyjnych są szczególnie istotne, gdyż użytkownicy spędzają w nich bardzo dużą część dnia, a jakość powietrza wpływa na efektywność pracy umysłowej. W [12] opisano wyniki pomiarów z 64 szkół (92 sal lekcyjnych) w okolicach Monachium, z których wynikają niekorzystne warunki wewnętrzne związane z transportem pyłów PM do wnętrza pomieszczeń i wysokiego stężenia CO<sub>2</sub> w przypadku małej wymiany wentylacyjnej. Podobne wyniki badań otrzymano w szkole w Chennai w Indiach [13]. W tym przypadku szkoły były zlokalizowane w sąsiedztwie ruchliwej

drogi, a ruch samochodowy był głównym źródłem zanieczyszczeń. Rezultaty pomiarów przeprowadzonych w 11 szkołach z naturalnym systemem wentylacji w Portugalii przedstawiono w [14]. W tych przypadkach również zaobserwowano zależność między stężeniem pyłów na zewnątrz oraz wewnątrz obiektów. Wyniki pomiarów w Indiach i Portugalii miały posłużyć jako dodatkowy argument we wprowadzaniu polityki antyśmogowej w tych krajach.

Kraków położony jest w bardzo dużej dolinie. Ta niekorzystna lokalizacja sprawia, że naturalna wentylacja miasta jest bardzo utrudniona i przez wiele dni w roku prędkość powietrza jest bardzo mała. Ze względu na powszechne stosowanie węgla do ogrzewania mieszkań i intensywny ruch miejski w historycznym centrum miasta, emisja zanieczyszczeń jest bardzo duża, co powoduje bardzo duże stężenie pyłów zawieszonych PM10 i PM2,5 w powietrzu atmosferycznym. Miasto wdrożyło politykę wymiany pieców tzw. kopciuchów, zakaz palenia palivami stałymi oraz używania kominów, które są głównym źródłem zanieczyszczeń tzw. niskoemisyjnych. Problemem wciąż pozostają jednak gminy ościenne, które takich ograniczeń nie wprowadzają, a miasto pozostaje pod ich bezpośrednim wpływem.

Wymagania krajowe zawarte w rozporządzeniu [15] regulują wyłącznie dopuszczalny poziom pyłów zawieszonych w powietrzu zewnętrznym. W rozporządzeniu tym podano poziom stężenia pyłów, powyżej którego społeczeństwo jest informowane o potencjalnym zagrożeniu. Nie istnieją żadne przepisy regulujące lub kontrolujące poziom stężenia pyłów w pomieszczeniach. W przypadku przekroczenia poziomu alarmowego na zewnątrz Główny Inspektorat Ochrony Środowiska zaleca bezwzględne ograniczenie aktywności na zewnątrz oraz pozostawanie w budynkach i nieotwieranie okien. Jakość powietrza zewnętrznego w Polsce jest klasyfikowana wg sześciu wartości indeksu jakości powietrza (AQI – air quality index). Odpowiednie wartości stężenia PM10 i PM2,5 przedstawiono w tabeli 1.

**Tabela 1. Indeks jakości powietrza zewnętrznego**

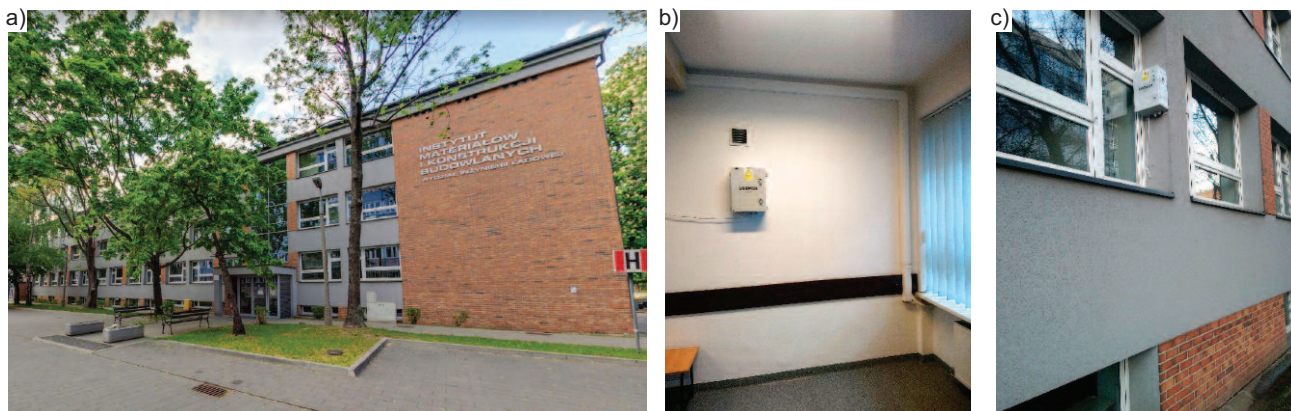
*Table 1. External air quality index*

Indeks jakości powietrza	PM10 [µg/m <sup>3</sup> ]	PM2,5 [µg/m <sup>3</sup> ]
Bardzo dobry	0 – 20	0 – 13
Dobry	20,1 – 50	13,1 – 35
Umiarkowany	50,1 – 80	35,1 – 55
Dostateczny	80,1 – 110	55,1 – 75
Zły	110,1 – 150	75,1 – 110
Bardzo zły	>150	>110

## Badania in situ

**Charakterystyka analizowanych sal.** Badania przeprowadzono w dwóch salach zlokalizowanych w budynku kampusu Politechniki Krakowskiej (L1) przy ulicy Warszawskiej 24 (fotografia 1a), przeznaczonych na potrzeby edukacyjne. Analizowane sale zlokalizowane są na parterze budynku i oznaczone numerami 6 oraz 11. Ogólna charakterystyka sal przedstawiona została w tabeli 2. W obu salach w okresie od 1 października 2020 r. do 31 marca 2021 r. prowadzone były ciągłe pomiary stężenia pyłów zawieszonych PM10, PM2,5 przy użyciu czujników Looko2. Oba pomieszczenia w tym okresie nie były używane z powodu pandemii. Wszystkie okna oraz drzwi były więc cały czas zamknięte oraz nie występowały żadne dodatkowe wewnętrzne źródła zanieczyszczeń typu palenie, otwarty ogień, gotowanie itp. W każdej z sal czujnik umieszczony był na ścianie w odległości 2 m nad poziomem podłogi (fotografia 1b). Trzeci czujnik zlokalizowany został na ścianie zewnętrznej budynku (fotografia 1c).

Na poziom stężenia zanieczyszczeń wewnątrz pomieszczenia wpływa wentylacja oraz infiltracja. Określenie całkowitej wymiany powietrza między pomieszczeniem a środowiskiem zewnętrznym jest bardzo trudne, gdyż zależy od warunków atmosferycznych. Można zbadać szczelność obudwy budynku czy pomieszczenia przy użyciu metody wentylatorowej z wykorzystaniem zestawu drzwi nawiewnych Blowerdoor. W obu pomieszczeniach przeprowadzono takie pomiary, w stanie użytkowania pomieszczeń, z otwartymi kratkami wentylacyjnymi oraz przy zamkniętych przewodach wentylacyjnych. Wartości n<sub>50</sub>, określające liczbę wymian



Fot. 1. Budynek L1 w kampusie Politechniki Krakowskiej przy ulicy Warszawskiej 24 (a); czujnik looko2 na ścianie wewnętrznej analizowanego pomieszczenia (b); czujnik looko2 na zewnątrz budynku (c)

Photo 1. Building L1 campus of Cracow University of Technology, 24 Warszawska Street (a); looko2 sensor on the internal wall of the analyzed room (b); looko2 sensor outside the building (c)

powietrza na godzinę przy różnicy ciśnienia 50 Pa przedstawiono w tabeli 3.

Wyniki przy zamkniętych przewodach wentylacyjnych opisują szczelność obudowy, która w przypadku sali numer 6 jest większa niż sali 11 (wskaźnik  $n_{50}$  jest mniejszy). W przypadku otwartych przewodów otrzymujemy informację o wymianie powietrza w stanie użytkowania uwzględniającą wymianę wen-

Tabela 2. Charakterystyka badanych sal wykładowych

Table 2. Characteristics of the analyzed lecture classes

Charakterystyka sali	Sala numer 6	Sala numer 11
Przeznaczenie	zajęcia projektowe, wykłady	sala komputerowa
Kubatura [m <sup>3</sup> ]	191,5	146,9
Powierzchnia [m <sup>2</sup> ]	64,9	49,9
Liczba okien	4 okna – 2,55 x 1,8 m	3 okna – 2,55 x 1,8 m
Maksymalna liczba użytkowników	40 osób	20 osób
Wentylacja	grawitacyjna, trzy otwory wentylacyjne w pomieszczeniu (10 x 10 cm), nawiewniki w oknach	grawitacyjna, dwa otwory wentylacyjne w pomieszczeniu (10 x 10 cm), nawiewniki w oknach

Tabela 3. Wyniki badania szczelności metodą Blowerdoor

Table 3. Results of Blowerdoor airtightness tests

Szczelność	Numer sali	
	6	11
$n_{50}$ [1/h] – otwarte przewody wentylacyjne	4,84	2,76
$n_{50}$ [1/h] – zamknięte przewody wentylacyjne	1,07	2,05

tylacyjną i w tym przypadku większą wartość obserwujemy w sali 6. Można wstępnie wnioskować, że w tej sali należy się spodziewać większego stężenia pyłów zawieszonych w przypadku ich podwyższonego stężenia na zewnątrz.

**Analiza stężenia wewnętrznego i zewnętrznego.** Wyniki wszystkich pomiarów z analizowanego okresu zostały wykorzystane w analizie statystycznej. Do analizy trendu zmian wybrano krótki okres – od 15.12.2020 do 18.12.2020, gdyż w ciągu tych dni można było zaobserwować duże wahania stężenia pyłów PM w środowisku zewnętrznym. Na rysunkach 1 i 2 przedstawiono zmianę stężenia pyłów PM<sub>2,5</sub> oraz PM<sub>10</sub> w przypadku analizowanych sal oraz na zewnątrz budynku w analizowanym okresie. Przez kilkanaście godzin stężenie zewnętrzne PM<sub>2,5</sub> osiągało poziom powyżej 75 µg/m<sup>3</sup>, natomiast w tych samych godzinach poziom PM<sub>10</sub> przekraczał 110 µg/m<sup>3</sup>, co oznacza złą jakość powietrza (tabela 1). Jednocześnie stan powietrza wewnątrz budynku był w tych samych godzinach dobry lub umiarkowany. Można wnioskować, że duża szczelność obudowy budynku (mała wymiana wentylacyjna) jest w tym przypadku korzystna dla użytkowników.

Zależność I/O w przypadku pyłu PM<sub>10</sub>, w analizowanym okresie, została przedstawiona na rysunku 3. Przy małym zewnętrznym stężeniu PM<sub>10</sub> wskaźnik I/O wynosi 0,3 – 0,6. Wraz ze wzrostem stężenia na zewnątrz, stężenie wewnętrzne również się zwiększa. Jednocześnie zwiększa się różnica między

tymi wartościami, dlatego też wskaźnik I/O wykazuje tendencję malejącą.

W sali 11 stężenie pyłów obu frakcji było mniejsze niż w sali 6, ale zmienność jest podobna. Stosunek I/O jest również mniejszy w przypadku sali 11. Potwierdza to wolniejszą wentylacyjną wymianę powietrza między pomieszczeniem a środowiskiem zewnętrznym. Wzajemna zależność pomiędzy stężeniem pyłów wewnątrz i na zewnątrz we wszystkich przypadkach jest wyraźnie widoczna. Stwierdzono, że wzrost stężenia PM wewnątrz pomieszczeń następuje z pewnym opóźnieniem względem stężenia na zewnątrz budynku. W przypadku ciągłego monitorowania warunków zewnętrznych przesunięcie umożliwiłoby reakcję użytkowników w celu uniknięcia niebezpiecznego wzrostu zanieczyszczeń wewnątrz pomieszczeń. Postawiono zatem pytanie, jaki jest okres opóźnienia wzrostu stężenia wewnętrznego pyłów. Do odpowiedzi na pytanie posłużyła analiza statystyczna wyników pomiarów.

### Analiza statystyczna wyników pomiarów

Do wyznaczenia zmiany odczytu w pomieszczeniu na podstawie zmiany odczytów zewnętrznych zastosowano regresję wielokrotną opisaną wzorem:

$$\Delta y = A\Delta x_1 + B\Delta x_2 + C\Delta x_3 + D$$

gdzie:

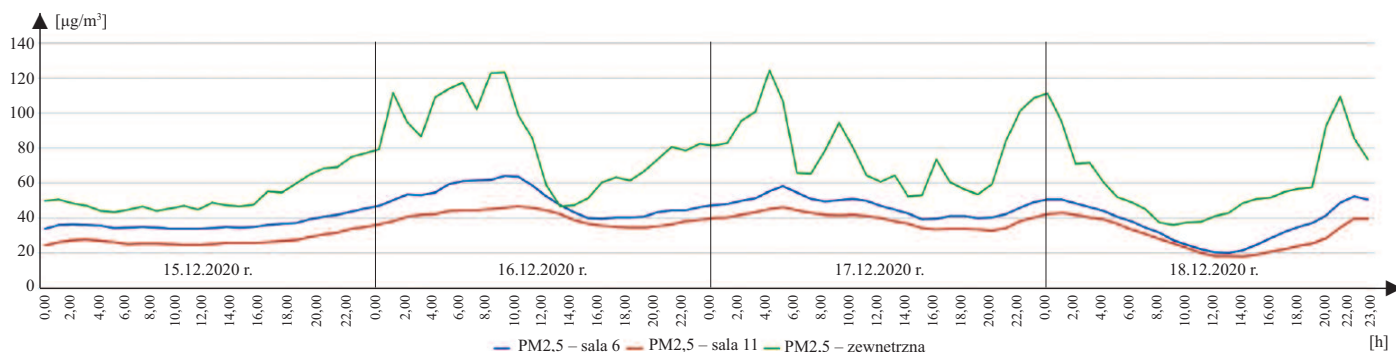
$$\Delta y = y_n - y_{n-1};$$

$$\Delta x_1 = x_n - x_{n-1};$$

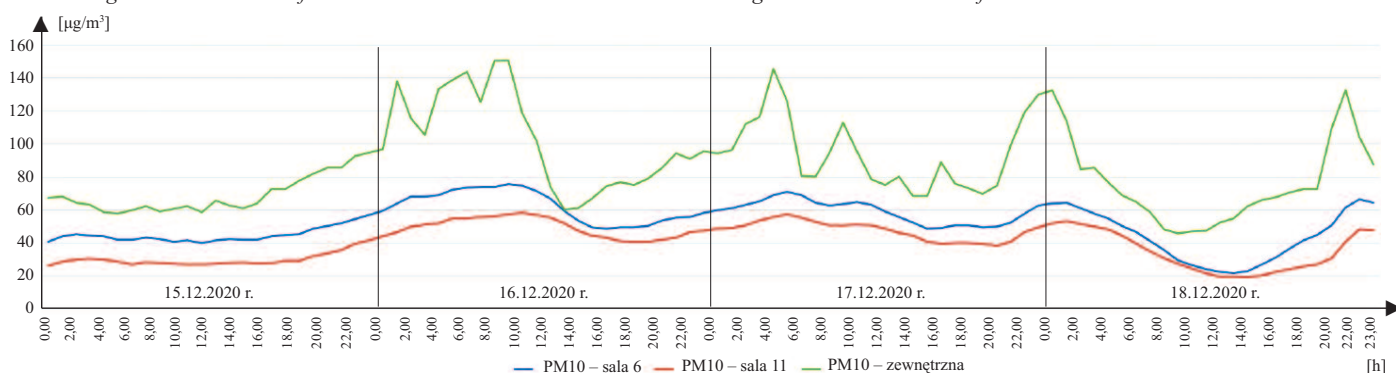
$$\Delta x_2 = x_{n-1} - x_{n-2};$$

$$\Delta x_3 = x_{n-2} - x_{n-3};$$

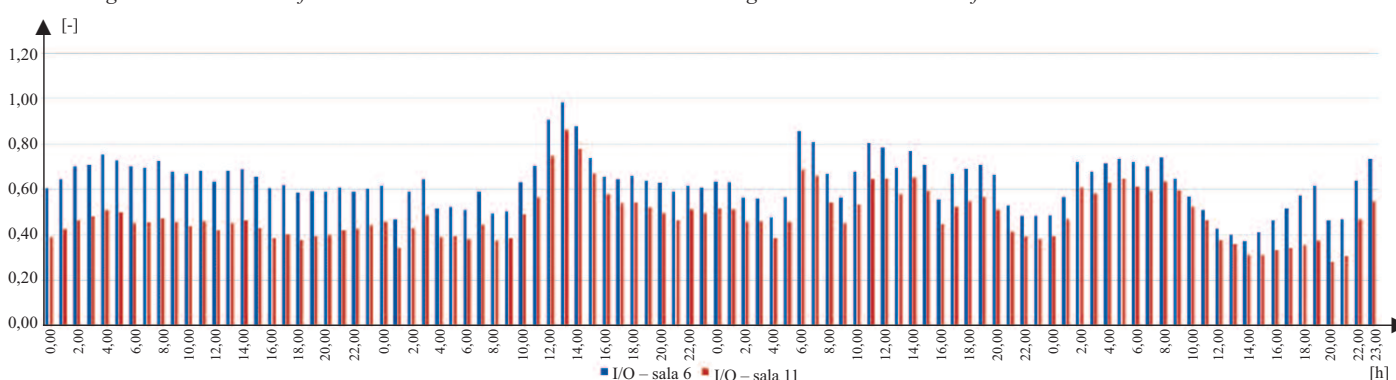




**Rys. 1. Stężenie pyłów PM2,5 w salach oraz na zewnątrz budynku w okresie 15 – 18.12.2020**  
 Fig. 1. Concentration of PM2.5 inside the classes and outside the building between 15<sup>th</sup> and 18<sup>th</sup> of December 2020



**Rys. 2. Stężenie pyłów PM10 w salach oraz na zewnątrz budynku w okresie 15 – 18.12.2020**  
 Fig. 2. Concentration of PM10 inside the classes and outside the building between 15<sup>th</sup> and 18<sup>th</sup> of December 2020



**Rys. 3. Wskaźnik I/O pyłów PM10 w przypadku sal w okresie 15 – 18.12.2020**  
 Fig. 3. PM10 I/O index inside the rooms between 15<sup>th</sup> and 18<sup>th</sup> of December 2020

oznaczenia:

- $y_n$  – odczyt aktualny w pomieszczeniu;
- $y_{n-1}$  – odczyt sprzed godziny w pomieszczeniu;
- $x_n$  – odczyt aktualny na zewnątrz;
- $x_{n-1}$  – odczyt sprzed godziny na zewnątrz;
- $x_{n-2}$  – odczyt sprzed dwóch godzin na zewnątrz;
- $x_{n-3}$  – odczyt sprzed trzech godzin na zewnątrz.

Ten rodzaj aproksymacji danych pomiarowych miał posłużyć znalezieniu odpowiedzi na pytanie, jaki wpływ ma zmiana stężenia zanieczyszczeń zewnętrznych na zmianę stężenia zanieczyszczeń wewnątrz pomieszczenia, co pozwala na określenie przesunięcia czasowego zmian przez wyznaczenie współczynników A, B, C oraz wybranie z nich współczynnika o największej

wartości. W wyniku wstępnej analizy zaniechano używania stałej D (tabela 4), gdyż okazała się nieistotna, co uprościło model do formy:

$$\Delta y = A\Delta x_1 + B\Delta x_2 + C\Delta x_3$$

Wartość P w każdym analizowanym przypadku była mniejsza od 0,05, co pozwala stwierdzić na poziomie ufności 95%, że każdy ze współczynników jest istotny. Ocena istotności zależności oraz miarę jakości dopasowania modelu przedstawiono w tabeli 5.

Wartość P w każdym analizowanym przypadku była mniejsza od 0,05 w przypadku poszczególnych współczynników.

Można więc odrzucić hipotezę zerową o braku zależności, co pozwala stwierdzić na poziomie ufności 95%, że każda z zależności jest istotna.

Największą wartość we wszystkich analizowanych przypadkach osiąga współczynnik B, co oznacza, że zmiana  $\Delta x_2$  (odczyt sprzed dwóch godzin) ma największy wpływ na zmianę  $\Delta y$  przy założeniu, że  $\Delta x_1 = \Delta x_2 = \Delta x_3 \neq 0$ . Na podstawie analizy wnioskuję, że po dwóch godzinach od zwiększenia stężenia pyłów na zewnątrz nastąpi wzrost ich stężenia wewnątrz pomieszczenia. Jest to czas, w którym należy zamknąć wszystkie okna oraz wyłączyć

**Tabela 4. Wyniki analizy sal 6 i 11 w przypadku różnego stężenia PM**  
 Table 4. Results of analysis for rooms 6 and 11 for different PM concentrations

Sala	Współczynnik	Wartość estymowana	Błąd	Statystyka	Wartość P
PM2,5 – Sala #6	A	0,0860	0,0038	22,7507	0,0000
PM2,5 – Sala #6	B	<b>0,1429</b>	0,0039	36,3477	0,0000
PM2,5 – Sala #6	C	0,1110	0,0037	30,3413	0,0000
PM2,5 – Sala #11	A	0,0413	0,0027	15,2842	0,0000
PM2,5 – Sala #11	B	<b>0,0909</b>	0,0028	31,9969	0,0000
PM2,5 – Sala #11	C	0,0860	0,0027	32,1972	0,0000
PM10 – Sala #6	A	0,0863	0,0038	22,6149	0,0000
PM10 – Sala #6	B	<b>0,1422</b>	0,0040	35,5763	0,0000
PM10 – Sala #6	C	0,1162	0,0037	31,7378	0,0000
PM10 – Sala #11	A	0,0442	0,0027	16,2865	0,0000
PM10 – Sala #11	B	<b>0,0940</b>	0,0029	32,8742	0,0000
PM10 – Sala #11	C	0,0906	0,0027	33,8549	0,0000

**Tabela 5. Ocena istotności zależności oraz miara skorygowania R<sup>2</sup>**

Table 5. Assessment of the significance of the relationship and the R squared correction measure

Sala	Analiza wariancji wartość F	Miara skorygowania R <sup>2</sup>	Wartość P
PM2,5 – Sala #6	1623,15	59,7%	0,0000
PM2,5 – Sala #11	1335,96	48,9%	0,0000
PM10 – Sala #6	1571,68	59,5%	0,0000
PM10 – Sala #11	1423,19	50,5%	0,0000

wewnętrzne oczyszczacze powietrza, jeśli pomieszczenie jest w takie wyposażone. W przypadku sali 6 odpowiednie wartości współczynników są większe niż w sali 11, co potwierdza większą podatność na zmianę stężenia zanieczyszczeń wewnątrz w wyniku zmiany wartości zanieczyszczeń na zewnątrz. Jest to zapewne skutkiem większej wymiany wentylacyjnej w sali 6.

## Podsumowanie

Duże stężenie pyłów zawieszonych w środowisku zewnętrznym wpływa negatywnie na jakość powietrza wewnątrz pomieszczeń. Pomiary przeprowadzone w dwóch analizowanych pomieszczeniach oraz w środowisku zewnętrznym wykazały wzajemną zależność pomiędzy stężeniami. Zaobserwowano, że wzrost stężenia PM wewnątrz pomieszczeń następuje z pewnym opóźnieniem względem stężenia na zewnątrz budynku. Analiza statystyczna wyników pomiarów wykazała, że „przesunięcie” to wynosi ok. dwóch godzin. W przypad-

ku ciągłego monitorowania warunków zewnętrznych informacja ta umożliwiła użytkownikom zareagowanie na nadchodzące pogorszenie warunków wewnątrz pomieszczenia przez zamknięcie okien czy włączenie oczyszczacza powietrza. W obu analizowanych pomieszczeniach występuje wentylacja naturalna, a wymiana powietrza jest niewielka. Można to uznać za formę ochrony przestrzeni wewnętrznej przed wnikaniem cząstek stałych ze środowiska zewnętrznego, ale jednocześnie powoduje to dyskomfort w wyniku szybkiego wzrostu stężenia CO<sub>2</sub> generowanego metabolicznie podczas użytkowania pomieszczeń. Zastosowanie wywiewnej wentylacji mechanicznej pozwoliłoby zintensyfikować wymianę powietrza w czasie, gdy jakość powietrza zewnętrznego jest dobra. Obserwacja warunków zmieniającego się stężenia poziomu pyłów PM na zewnątrz dawałaby w takim przypadku informację, że w momencie zaobserwowania wzrostu tego stężenia powinna zostać wyłączona wentylacja mechaniczna i ewentualnie włączone oczyszczacze powietrza.

## Literatura

- [1] Cohen A, Anderson A, Ostro B, Pandey K, Krzyzanowski M, Kunzli N, Gutschmidt K, Pope A, Romieu I, Samet J, Smith K. The global burden of disease due the outdoor air pollution. *Journal of Toxicology and Environmental Health*. 2005; Part A, 68: 1 – 7.
- [2] Taylor J, Shrubsole C, Davies M, Biddulph, Das P, Hamilton I, Vardoulakis S, Mavrogianni A, Jones B, Oikonomou E. The modifying effect of the building envelope on population exposure to the PM2.5 from outdoor sources. *Indoor Air*. 2014; 24: 639 – 651.
- [3] Arideep M, Madhoolika A. World air particulate matter: sources, distribution and health ef-

fects, *Environmental Chemistry Letters*. 2017; 15: 283 – 309.

[4] Quang T, He C, Morawska L, Knibbs L. Influence of ventilation and filtration on the indoor particle concentrations in urban office buildings. *Atmospheric Environment*. 2013; 79: 41 – 52.

[5] Spilak M, Karottki G, Kolaric B, Frederiksen M, Loft S, Gunnarsen L. Evaluation of building characteristics in 27 dwellings in Denmark and the effect of using particle filtration units on PM2.5 concentrations. *Building and Environment*. 2014; 73: 55 – 63.

[6] Chen Ch, Zhao B. Review of relationship between indoor and outdoor particles: I/O ratio, infiltration factor and penetration factor. *Atmospheric Environment*. 2011; 45: 275 – 288.

[8] Almeida S, Canha N, Silva A, Freitas M, Pegas P, Alves C, Evtuygina M, Pio C. Children exposure to atmospheric particles in indoor of Lisbon primary schools. *Atmospheric Environment*. 2011; 45: 7594 – 7599.

[8] Bekierski D, Kostyrko K. The influence of Particulate Matter PM2.5 on Indoor Air Quality: the Implementation of a New Assessment Method. *Energies*. 2021; 14: 6230.

[9] Monn Ch, Hogger D, Fuchs A, Junker M, Kogelschatz D, Roth N, Wanner H. Particulate matter less than 10 um (PM10) and fine particles less than 2.5 um (PM2.5): relationships between indoor, outdoor and personal concentrations. *The Science of the Total Environment*. 1997; 208: 15 – 21.

[10] Estakova A, Stevulova N, Kubincova L. Particulate matter investigation in indoor in indoor environment, *Global NEST Journal*. 2010; 12(1).

[11] Bartyzel J, Smoleń K. Ocena wpływu zanieczyszczeń pyłowych na zewnątrz budynków na jakość powietrza wewnątrz pomieszczeń, RAPORT, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH, 2017.

[12] Fromme H, Twardella D, Dietrich S, Heitmann D, Schierl R, Liebl B, Rüdiger H. Particulate matter in the indoor air of classrooms – exploratory results from Munich and surrounding area, *Atmospheric Environment*, Volume 41, Issue 4, February 2007, Pages 854-866, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.08.053>

[13] Chithra VS, Shiva Nagendra SM. Indoor air quality investigations in a naturally ventilated school building located close to an urban roadway in Chennai, India, *Building and Environment* Volume 54, August 2012, Pages 159-167, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.01.016>.

[14] Madureira J, Paciência I, Oliveira Fernandes E. Levels and Indoor – Outdoor Relationships of Size-Specific Particulate Matter in Naturally Ventilated Portuguese Schools, *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A Current Issues* Volume 75, 2012 – Issue 22-23, <https://doi.org/10.1080/15287394.2012.721177>.

[15] Rozporządzenie Ministra Środowiska z 8 października 2019 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie poziomów niektórych substancji w powietrzu.

Przyjęto do druku: 03.01.2024 r.