

RAPORT

Ocena wpływu zanieczyszczeń pyłowych na zewnątrz budynków na jakość powietrza wewnątrz pomieszczeń

dr inż. Jakub Bartyzel
mgr inż. Katarzyna Smoleń

Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH

Raport wykonano na zlecenie
Stowarzyszenia „*Krakowski Alarm Smogowy*”.

Kraków, październik 2017

Działanie w ramach projektu "Wdrażanie Programu ochrony powietrza dla województwa małopolskiego –
Małopolska w zdrowej atmosferze." „LIFE14 IPE PL 021/LIFE IP MAŁOPOLSKA”



WSTĘP

W ostatnich latach uległa rozbudowie sieć stacji pomiaru jakości powietrza w ramach Państwowego Monitoringu Środowiska (PMŚ). Największy wzrost liczby stacji odnotowano w województwie małopolskim. W Krakowie liczba stacji wzrosła z 3 w 2015 roku do 8 w roku 2017. W ramach rozbudowy sieci o nowe stacje główny nacisk kładziony jest na pomiar stężenia pyłu zawieszonego. Wszystkie nowe stacje wyposażone są w przyrządy do pomiaru pyłu PM₁₀. Sytuacja taka związana jest z dużym naciskiem społecznym na kontrolę zanieczyszczenia powietrza pyłem zawieszonym. Poza stacjami PMŚ powstają również inicjatywy społeczne i prywatne mające na celu budowę rozległych sieci czujników jakości powietrza, również pod kontem zanieczyszczeń pyłowych. Sieci tego typu wykorzystują czujniki generujące dane niższej jakości. Podstawową zaletą tego typu sieci jest jednak bardzo duża liczba punktów pomiarowych.

Ustawodawstwo krajowe reguluje poziomy dopuszczalne pyłów zawieszonych w powietrzu na zewnątrz (Dz.U. 2012 poz. 1031) i wyłącznie takie pomiary wykonywane są w ramach PMŚ. Dodatkowo w powyższym rozporządzeniu Ministra Środowiska definiowane są poziomy informowania oraz alarmowy. W przypadku przekroczenia tego ostatniego Główny Inspektorat Ochrony Środowiska (GIOŚ) zaleca bezwzględne ograniczenie aktywności na zewnątrz ze szczególnym naciskiem na osoby chore (GIOŚ, 2017). Podobne komunikaty i zalecenia podawane są również przez lokalne samorządy oraz Europejską Agencję Środowiska (AirNow, 2017). Na stronach Wojewódzkiego Inspektoratu Ochrony Środowiska w Krakowie (WIOŚ Kraków), zalecenia do pozostawania w domach pojawiają się już w momencie przekroczenia wartości stężeń pyłów zawieszonych powyżej 100 µg/m³ (WIOŚ Kraków, 2017).

Mając na uwadze powyższe zalecenia postanowiono sprawdzić wpływ stężeń zanieczyszczeń pyłowych na zewnątrz pomieszczeń na stężenia wewnątrz budynków. W celu przeprowadzenia badań wykorzystano dwa pyłomierze optyczne: jeden umieszczony na zewnątrz, a drugi wewnątrz budynku. Dodatkowymi parametrami branymi pod uwagę były typ budynku jego konstrukcja oraz rodzaj wentylacji. Pod uwagę wzięto 11 lokalizacji o zróżnicowanym typie wentylacji oraz wieku i kondycji budynku (patrz tab. 2). W odróżnieniu od innych prac tego typu (Ando i in., 1991, Estkova i in. 2010, Branis M., 2011), postanowiono zastosować również podejście modelowe w celu oszacowania bezpośredniego wpływu zanieczyszczeń zewnętrznych na jakość powietrza wewnątrz budynków. Podejście takie pozwoliło na wyznaczenie parametrów charakterystycznych dla każdej lokalizacji.

Badania miały na celu zobrazowanie wpływu zanieczyszczeń pyłowych w powietrzu miasta Krakowa oraz innych miejscowości na jakość powietrza wewnątrz budynków. Przeprowadzone analizy skupiały się na przenikaniu zanieczyszczeń z zewnątrz do wnętrza budynków. Wpływ na jakość powietrza wewnątrz budynków mają również emisje pyłów oraz aerozoli mające miejsce wewnątrz pomieszczeń. Do największych emitatorów pyłów

wewnątrz pomieszczeń zaliczyć możemy kominki opalane drewnem, oraz sprzątanie, które bardzo często podnosi pył zdeponowany na powierzchniach podłóg i mebli.

Dla prawidłowego przeprowadzenia modelowania należało odrzucić wszystkie sytuacje kiedy na jakość powietrza wewnątrz pomieszczeń wpływ mają czynniki inne niż zanieczyszczenia przedostające się z zewnątrz. Do czynników zaburzających modelowanie należy również zaliczyć sytuacje wietrzenia pomieszczeń podczas występowania na zewnątrz podwyższonych stężeń pyłu zawieszonego. W niektórych obiektach wyraźnie obserwowano wzrost mierzonych wewnątrz stężeń pyłów podczas wietrzenia pomieszczeń. Dla celów modelowania postanowiono odrzucić wszystkie zaburzające epizody. Dokonano tego na podstawie dzienników, do prowadzenia których na czas prowadzenia badań zobligowani byli użytkownicy lokali.

Oszacowanie wpływu stężenia zanieczyszczeń pyłowych na zewnątrz pomieszczeń na jego stężenia w budynkach jest zadaniem złożonym, szczególnie biorąc pod uwagę, iż wpływ zanieczyszczeń zewnętrznych na stężenia w pomieszczeniu może być rozłożony w czasie. Strumień wymiany powietrza jest na tyle mały w stosunku do objętości pomieszczenia, że wyraźnie zaobserwować możemy mieszanie wewnątrz pomieszczenia powietrza pochodzącego z zewnątrz z tym zalegającym w pomieszczeniu. Postanowiono porównać stężenia pyłów na zewnątrz oraz wewnątrz pomieszczeń poprzez modelowanie zachowania się zanieczyszczeń wewnątrz pomieszczeń przy założeniu znanego stężenia na zewnątrz. Podczas badań dokonywano pomiarów stężenia pyłów zawieszonych wewnątrz oraz na zewnątrz identycznymi urządzeniami pomiarowymi DustTrak 8540 z rozdzielczością czasową 2 minuty. Pomiary w danej lokalizacji prowadzono w okresach od 4 do 14 dni.

Zasada pomiaru stężenia pyłów zawieszonych za pomocą urządzeń Dust Trak oparta jest na rozpraszaniu światła laserowego na drobkach pyłu zawartych w powietrzu. Przed każdym pomiarem urządzenia ustawiane były na wspólny kilkugodzinny pomiar w celu upewnienia się że uzyskiwane z nich wartości są tożsame. Dla prowadzonych badań bardziej istotna była spójność wskazań obu urządzeń aniżeli ich zgodność z wartością rzeczywistą. Z uwagi na wykorzystanie uzyskanych danych do porównań z wartościami raportowanymi przez WIOŚ, urządzenia zostały uprzednio porównane z metodą referencyjną (grawimetryczną) i wprowadzono odpowiednie współczynniki kalibracji.

Posiadając wysokorozdzielczą informację o stężeniu modelowano stężenie wewnątrz pomieszczenia posiadając jako informacją wejściową stężenie na zewnątrz budynku. Parametrami modelu były prędkość wymiany powietrza w danym pomieszczeniu (mieszkaniu, domu budynku użyteczności publicznej) oraz współczynnik filtrowania pyłów zawieszonych podczas ich wnikania do wnętrza budynku. Współczynnik filtrowania wynikał z założenia, że nie cały pył przedostaje się do wnętrza pomieszczenia wraz z powietrzem do niego przenikającym. Modyfikując powyższe parametry uzyskiwano szeroki zestaw teoretycznych (modelowych) przebiegów stężenia pyłów zawieszonych wewnątrz budynku. Metodami statystycznymi wybierano parametry dla których modelowy przebieg

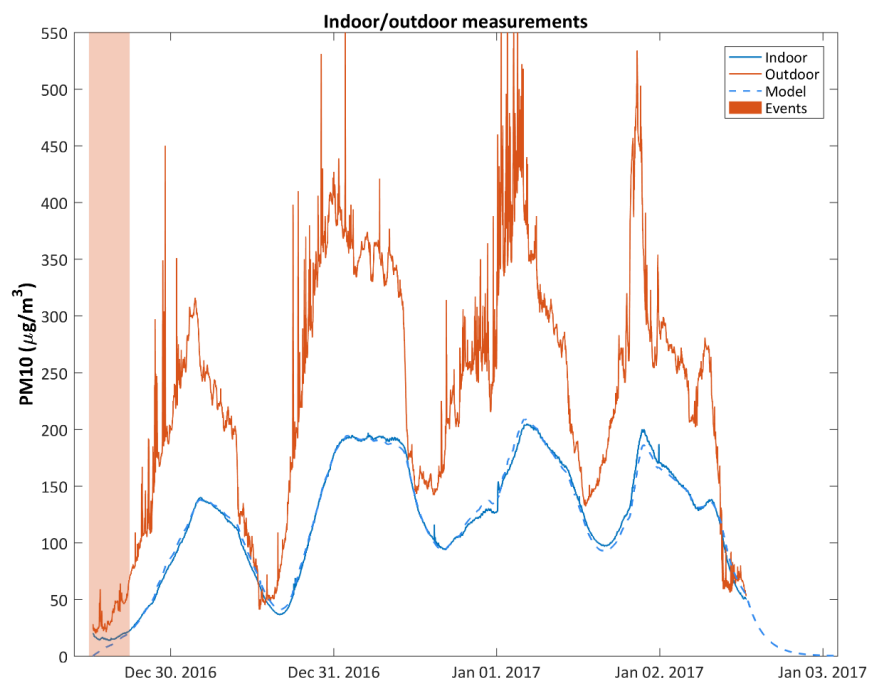
stężenia był najbardziej podobny do przebiegu zmierzonego. Uzyskane parametry przypisywano do danej lokalizacji pomiarowej.

Dodatkowo przetestowano wpływ wielkości frakcji pyłów zawieszonych na wyznaczone parametry dla konkretnego lokalu. W jednym z przypadków prowadzono równoczesny pomiar wszystkich trzech frakcji (PM10, PM2.5 oraz PM1.0) w drugim przypadku prowadzono najpierw pomiar frakcji PM10 natomiast tydzień później frakcji PM2.5.

Postanowiono również uwzględnić dodatkowe czynniki wewnątrz pomieszczeń mogące mieć wpływ na jakość powietrza, stosowanie kominków, oczyszczaczy powietrza oraz innych urządzeń. Dodatkową informacją było porównanie wyników pomiarów na zewnątrz dla danej lokalizacji z wynikami dostarczonymi przez PMŚ dla Krakowa.

WYNIKI

Poniżej zaprezentowano przykładowe przebiegi stężeń pyłu zawieszonego PM10 mierzone wewnątrz oraz na zewnątrz badanych lokali. Pierwszy przykład (rys. 1) pokazuje pomiary wykonane w lokalu przy ul. Felicjanek w Krakowie. Podczas trwania pomiarów nikt nie przebywał w pomieszczeniach. Nie było więc żadnych efektów zakłócających modelowanie przebiegów stężeń wewnątrz.

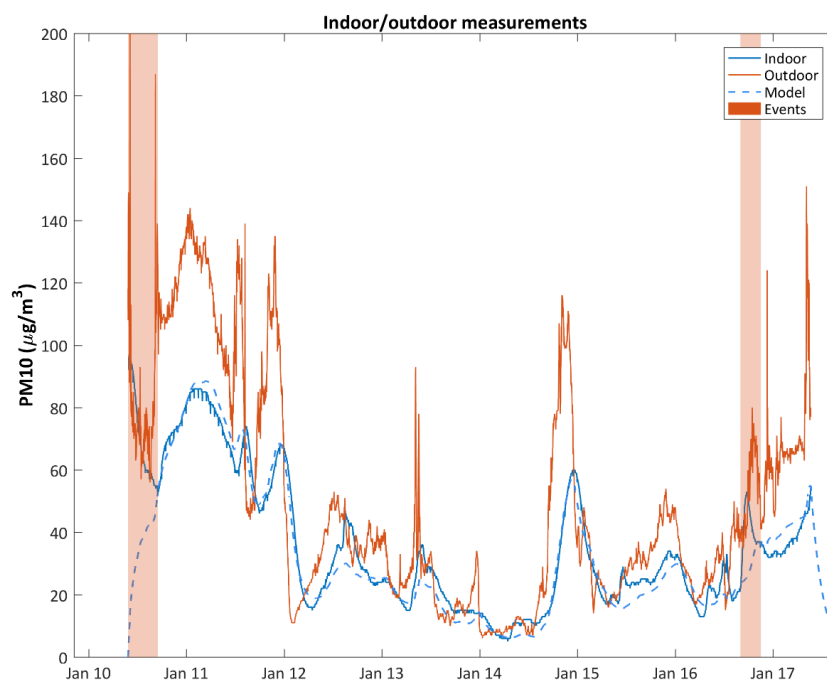


Rys. 1. Przebieg stężeń pyłu zawieszonego PM10 na zewnątrz oraz wewnątrz lokalu biurowego przy ulicy Felicjanek w Krakowie w dniach 29.12.2016 – 02.01.2017 r. Linią pomarańczową zaznaczono przebieg stężeń pyłów na zewnątrz lokalu, linią niebieską (ciągłą) - zmierzone stężenia wewnątrz, linią niebieską (przerywaną) - stężenia wewnątrz zamodelowane na podstawie przebiegu stężeń w powietrzu na zewnątrz, pomarańczowy pasek obrazuje dane odrzucone z uwagi na start pomiarów.

Na rysunku widać bardzo dobrą zgodność pomiędzy przebiegami mierzonymi, a wyznaczonymi z modelu co przejawia się bardzo niskim współczynnikiem dopasowania RMSE (por. tab. 1). Dodatkowym wnioskiem jaki można wyciągnąć z analizy powyższego przypadku jest wyraźnie uśrednianie stężeń zewnętrznych przez mieszanie powietrza wewnątrz pomieszczenia. Obserwowane wyraźnie 01.01.2017 fluktuacje w stężeniach na zewnątrz nie przenoszą się na powietrze wewnątrz lokalu. Otrzymany z obliczeń modelowych współczynnik redukcji wynosi 47% co oznacza, że ponad połowa pyłów z

powietrza zewnętrznego przedostaje się do wewnątrz. Dodatkowym parametrem wyznaczonym z modelu jest szybkość wymiany powietrza w pomieszczeniu, a dokładnie średni czas jego przebywania wynoszący w tym przypadku 2,4 godziny.

Kolejny przykład pomiarów dotyczy szpitala pulmonologicznego w Jaroszowcu (rys. 2). W tym przypadku urządzenie pomiarowe wewnątrz budynku również zostało zainstalowane w nieużytkowanym pomieszczeniu. Niemniej widać wyraźnie zakłócenie pomiarów wieczorem dnia 16 stycznia, związane najprawdopodobniej z otwarciem pomieszczenia i dostaniem się do niego powietrza z zewnątrz, co sugeruje wyrównanie się stężeń mierzonych przez urządzenia umieszczone na zewnątrz oraz wewnątrz budynku.

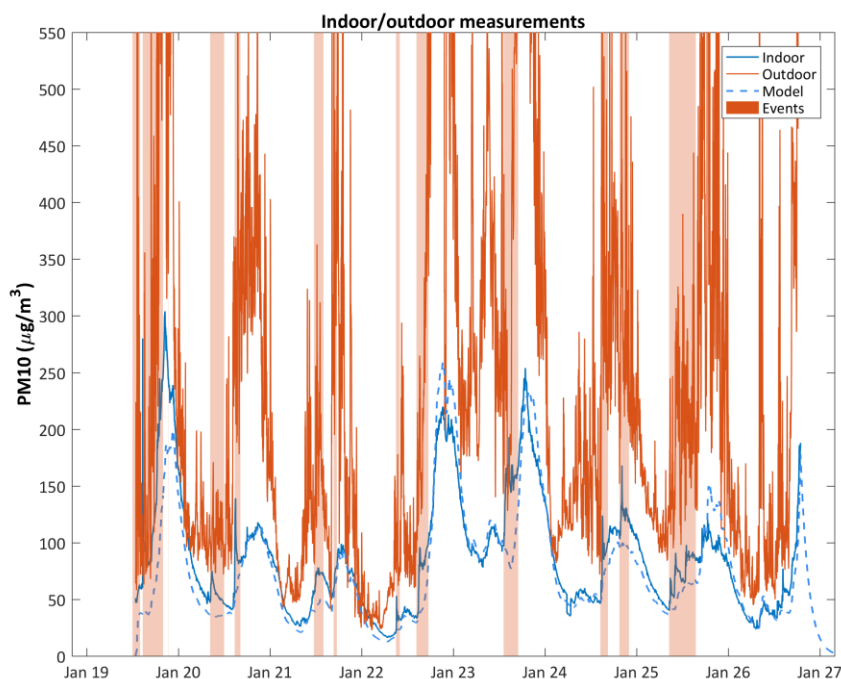


Rys. 2. Przebieg stężeń pyłu zawieszonego PM10 na zewnątrz oraz wewnątrz budynku szpitala pulmonologicznego w Jaroszowcu (woj. Małopolskie) w dniach 10 - 17.012017 r. Linia pomarańczową zaznaczono przebieg stężeń pyłów na zewnątrz budynku, linią niebieską, ciągłą zmierzone stężenia wewnątrz, linią niebieską przerywaną stężenia wewnątrz zamodelowane na podstawie przebiegu stężeń w powietrzu na zewnątrz, pomarańczowe paski obrazują dane odrzucone z uwagi na wystąpienie efektów zakłócających pomiar (start pomiarów, wietrzenie).

Zgodność pomiędzy wartościami mierzonymi, a modelowanymi jest również wyraźna co przejawia się wartością współczynnika RMSE wynoszącą 0,068. Jest to jednak współczynnik względny, a wartości stężeń w Jaroszowcu były dwukrotnie niższe niż w

przypadku pomiarów w Krakowie przy ul. Felicjanek stąd rzeczywista jakość dopasowania w Krakowie jest wyraźnie lepsza. Wyznaczony z modelu współczynnik redukcji wynosi 32%, oznacza to, że niemal dwukrotnie więcej pyłów z zewnątrz przedostaje się do wnętrza budynku, w porównaniu z lokalizacją przy ul. Felicjanek. W obu przypadkach tempo wymiany powietrza w pomieszczeniach jest na podobnym poziomie (por. tab. 1).

Kolejny przypadek dotyczy budynku mieszkalnego położonego w miejscowości Skala (rys. 3). Lokalizacja ta została wybrana z powodu położenia w miejscowości, gdzie notowano bardzo wysokie wartości stężeń pyłu zawieszonego oraz z uwagi na ogrzewanie budynku kominkiem.

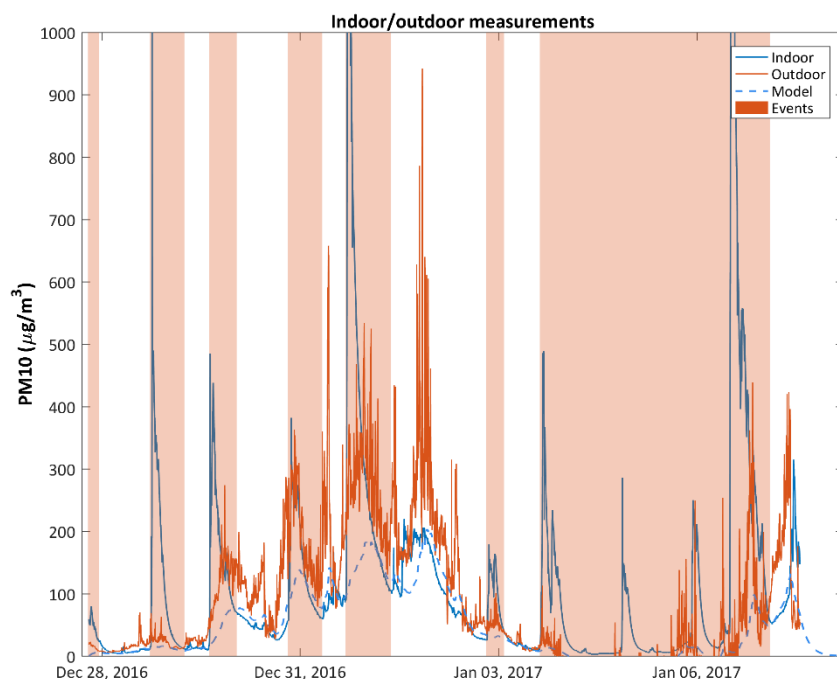


Rys. 3. Przebieg stężeń pyłu zawieszonego PM10 na zewnątrz oraz wewnątrz budynku mieszkalnego położonego w Skale (woj. Małopolskie) w dniach 19 - 26.01.2017 r. Linia pomarańczową zaznaczono przebieg stężeń pyłów na zewnątrz budynku, linią niebieską (ciągłą) - zmierzone stężenia wewnątrz, linią niebieską (przerywaną) - stężenia wewnątrz zamodelowane na podstawie przebiegu stężeń w powietrzu na zewnątrz, pomarańczowe paski obrazują dane odrzucone z uwagi na start pomiarów oraz emisje wewnątrz budynku.

Jak możemy zaobserwować na wykresie (rys. 3) stężenia pyłów zawieszonych PM10 na zewnątrz budynku były bardzo wysokie, ze średnimi godzinnymi przekraczającymi 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (por. rys. 7). Pomimo bardzo dużej zmienności czasowej stężeń pyłów na zewnątrz budynku widać wyraźne wygładzenie przebiegów wewnątrz. Niemniej, w wartościach bezwzględnych stężenia wewnątrz również były bardzo wysokie, często przekraczając 100

a nawet $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Przy dopasowywaniu modelu do przebiegów stężeń wewnątrz budynku nie brano pod uwagę okresów, w których pomieszczenia były wietrzone oraz innych sytuacji mogących wpłynąć na zapylenie wewnątrz pomieszczeń. Co bardzo interesujące na wykresie nie widać wpływu uzupełniania paliwa w kominku. Ma to prawdopodobnie związek z ciągłym użytkowaniem paleniska i jego nie wygaszaniem, co powoduje stabilny przepływ powietrza do komina i przeciwdziała wydostawaniu się dymu do pomieszczeń. Pomimo tak dobranych parametrów wartość współczynnika dopasowania jest pięciokrotnie wyższa niż w poprzednich przypadkach ($\text{RMSE} = 0,3$). Wpływ na jakość dopasowania mogą mieć poziomy stężenie oraz dynamika ich zmian w powietrzu na zewnątrz, współczynnik RMSE został wyznaczony dla wartości stężeń znacznie wyższych niż w poprzednich dwóch przypadkach. Wyznaczony z modelu współczynnik redukcji wynosi 68% i jest jednym z wyższych wśród mierzonych lokalizacji. Pomimo to stężenia wewnątrz budynku były bardzo wysokie, ze względu na bardzo wysokie stężenia pyłu na zewnątrz.

Pomiary w prowadzone w budynku mieszkalnym w Zarzycach Wielkich (rys. 4) również obarczone były zakłóceniami związanymi z używaniem kominka. Odmienne niż w

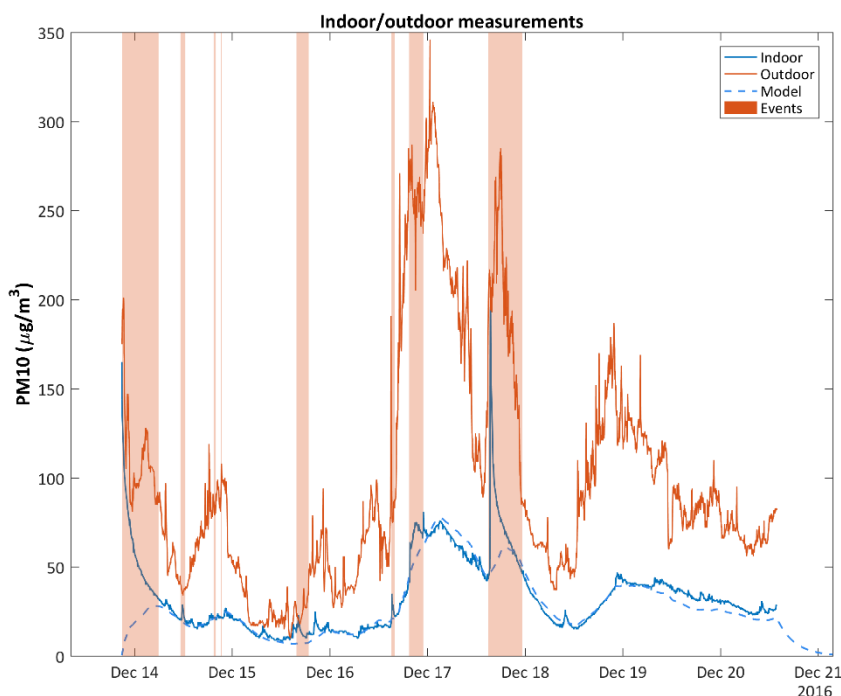


Rys. 4. Przebieg stężeń pyłu zawieszonego PM10 na zewnątrz oraz wewnątrz budynku mieszkalnego położonego w Zarzycach Wielkich (woj. Małopolskie) w dniach 28.12.2016 - 07.01.2017 r. Linia pomarańczową zaznaczono przebieg stężeń pyłów na zewnątrz budynku, linią niebieską (ciągłą) - zmierzone stężenia wewnątrz, linią niebieską (przerywaną) - stężenia wewnątrz zamodelowane na podstawie przebiegu stężeń w powietrzu na zewnątrz, pomarańczowe paski obrazują dane odrzucone z uwagi na start pomiarów oraz emisje wewnątrz budynku.

przypadku poprzednim kominek używany był jedynie epizodycznie w okresie wieczornym.

Inaczej niż w przypadku pomiarów w Skale na wykresie (rys. 4) widać bardzo duży wpływ rozpalania kominka na stężenia pyłu zawieszonego PM10 wewnątrz budynku. Różnica może być spowodowana epizodycznym używaniem kominka i brakiem właściwego przepływu powietrza przez komin co powoduje cofanie się spalin do wnętrza budynku. W związku z używaniem kominka chwilowe wartości stężeń pyłu zawieszonego dochodziły do $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ i eksponencjalnie spadały przez kilka godzin do wartości modelowanych. Zastosowanie modelu w tym przypadku pozwala również na zaobserwowanie bezpośredniego wpływu kominka na jakość powietrza wewnątrz z odcięciem wpływu powietrza zewnętrznego. Z uwagi na okres bardzo silnych mrozów przekraczających -20°C , oraz wystąpienie anomalnych wartości stężeń, wartości rejestrowane przez urządzenie na zewnątrz, w okresie 4-6.01.2017 r. zostały odrzucone. Po wyeliminowaniu wpływu kominka wartość współczynnika redukcji dla domu w Zarzycach wielkich wynosi 44%. Duża wartość współczynnika RMSE wynosząca 0.5 obliuguje do odrzucenia wyznaczonych wartości z uwagi na możliwość obarczenia ich dużym błędem.

Ostatni omawiany przykład dotyczy pomiarów w mieszkaniu przy ul. K. Wierzyńskiego (rys. 5). Pomiary prowadzone były w lokalu z wentylacją mechaniczną. W omawianym przypadku ustawiona na 25% mocy nominalnej.



Rys. 5. Przebieg stężeń pyłu zawieszonego PM10 na zewnątrz oraz wewnątrz mieszkania położonego przy ul. K. Wierzyńskiego w Krakowie, w dniach 13 - 20.12.2016 r. Linią pomarańczową zaznaczono przebieg stężeń pyłów na zewnątrz budynku, linią niebieską (ciągłą) - zmierzone stężenia wewnątrz, linią niebieską (przerywaną) - stężenia wewnątrz zamodelowane na podstawie przebiegu stężeń w powietrzu na zewnątrz, pomarańczowe paski obrazują dane odrzucone z uwagi na start pomiarów oraz emisje wewnątrz budynku.

Na wykresie (rys. 5) zaobserwować możemy kilka krótkich okresów dla których pomiary zostały odrzucone. Związane one były głównie z gotowaniem oraz odkurzaniem pomieszczeń. Dwa dłuższe okresy wyłączone z modelowania wiązały się z koniecznością umieszczenia urządzenia zewnętrznego na balkonie oraz rozszczelnieniem mieszkania. Jak widać zarówno 13 jak i 17 grudnia po otwarciu drzwi balkonowych wartość stężenia pyłu zawieszonego PM10 wewnątrz mieszkania wyrównywała się z wartością na zewnątrz, a następnie powoli dochodziły do wartości modelowanych. Po odrzuceniu pomiarów zafałszowanych przez otwieranie okien i inne czynniki wyznaczony współczynnik redukcji wynosi 70% i jest to najwyższa wartość otrzymana podczas całej kampanii pomiarowej. Zgodność modelu z wartościami mierzonymi jest również zadowalająca ze współczynnikiem RMSE na poziomie 0,06.

We wszystkich omawianych przypadkach wyraźnie obserwujemy występowanie okresów o stężeniach pyłów zawieszonych PM10 wewnątrz pomieszczeń znacznie przewyższających dopuszczalne prawem wartości. Podkreślić należy jednak, że jakość powietrza pod kątem stężenia pyłów zawieszonych jest lepsza w pomieszczeniach aniżeli na zewnątrz.

Tab. 1 Zestawienie lokalizacji w których prowadzone były pomiary jakości powietrza wewnątrz oraz na zewnątrz pomieszczeń wraz z mierzonymi frakcjami otrzymanymi wynikami: Średniego czasu przebywania (τ), współczynnika redukcji (r) oraz współczynnika dopasowania (RMSE)

Lp	Lokalizacja	Frakcja	τ (h)	r (%)	RMSE
1	Kraków – ul. K. Wierzyńskiego	PM 10	4.3	70%	0.062
2	Kraków – ul. K. Wierzyńskiego	PM 2.5	4.0	68%	0.032
3	Zarzyce Wielkie	PM 10	2.9	44%	0.501
4	Jaroszowiec	PM 10	2.9	32%	0.068
5	Kraków – ul. Felicjanek	PM 10	2.4	47%	0.064
6	Skała	PM 10	2.1	68%	0.300
7	Kraków – ul. Strzelców	PM 10	3.6	61%	0.303
8	Wadowice I	PM10	1.8	56%	0.093
9	Wadowice II	PM10	3.2	59%	0.344
10	Kościelisko I	PM10	4.2	42%	0.025
11	Kościelisko II A	PM10	0.9	22%	0.064
12	Kościelisko II B	PM10	1.2	38%	0.553
13	Balice	PM1	3.4	50%	0.033
14	Balice	PM2.5	3.3	47%	0.049
15	Balice	PM10	3.3	53%	0.053
16	Kraków – ul. K. Wierzyńskiego v. 2	PM10	4.0	62%	0.032
17	Kraków – ul. K. Wierzyńskiego v. 3	PM10	2.4	54%	0.034

W przypadkach bez występowania zakłóceń (lokal przy ul. Felicjanek) można jakościowo na podstawie wykresu stężeń ocenić ile zanieczyszczeń z zewnątrz przedostaje się do wnętrza pomieszczeń. Natomiast w przypadkach o bardzo dużej dynamice stężeń oraz wielu czynnikach przeszkadzających, model jest jedynym narzędziem pozwalającym na analizę wpływu zanieczyszczeń na zewnątrz pomieszczeń na te panujące w ich wnętrzu.

Tab. 2 Zestawienie lokalizacji w których prowadzone były pomiary jakości powietrza wewnątrz oraz na zewnątrz pomieszczeń wraz z opisami jakościowymi.

Lp	Lokalizacja	Opis
1,2	Kraków – ul. K. Wierzyńskiego	Mieszkanie prywatne w bloku, ogrzewanie gazowe (centralne), wentylacja mechaniczna wyciągowa, okna drewniane nowoczesne. Nawiewniki zamknięte, wentylacja 25%.
3	Zarzyce Wielkie	Dom prywatny wolnostojący, ogrzewanie gazowe i kominek, wentylacja grawitacyjna, okna plastikowe.
4	Jaroszowiec	Budynek użyteczności publicznej (szpital), ogrzewanie gazowe, wentylacja grawitacyjna, okna drewniane po renowacji
5	Kraków – ul. Felicjanek	Mieszkanie - biuro w kamienicy, ogrzewanie MPEC, wentylacja grawitacyjna, okna drewniane skrzynkowe.
6	Skała	Dom prywatny wolnostojący, ogrzewanie kominkiem i gazem, wentylacja grawitacyjna, okna plastikowe.
7	Kraków – ul. Strzelców	Mieszkanie prywatne w bloku, 4 piętro, ogrzewanie MPEC, wentylacja grawitacyjna, okna plastikowe, oczyszczacz powietrza, nebulizator
8	Wadowice I	Budynek użyteczności publicznej (przedszkole), po renowacji, ogrzewanie gazowe, wentylacja wymuszona mechaniczna cały czas włączona, okna plastikowe, położenie z dala od centrum miasta
9	Wadowice II	Budynek użyteczności publicznej (przedszkole), nieremontowane, ogrzewanie gazowe, grawitacyjna, okna drewniane, położenie przy drodze i blisko rynku.
10	Kościelisko I	Budynek użyteczności publicznej (szkoła), nowy budynek, pokój dyrektora bez wentylacji, okna plastikowe.
11	Kościelisko II	Dom prywatny, stary góralski dom po remoncie, wentylacja grawitacyjna, okna drewniane nowoczesne.
13,14,15	Balice	Dom prywatny wolnostojący, ogrzewanie gazowe, wentylacja grawitacyjna, okna drewniane nowoczesne
16	Kraków – ul. K. Wierzyńskiego v. 2	Por p. 1 Nawiewniki otwarte, wentylacja 25%
17	Kraków – ul. K. Wierzyńskiego v. 3	Por p. 1 Nawiewniki otwarte, wentylacja 50%

Podsumowując, wykonano badania w 11 lokalizacjach, uzyskano 17 zestawów parametrów dla różnych warunków. Współczynnik redukcji waha się pomiędzy 20 a 70% przy czym dużo mniej zanieczyszczeń przedostaje się do lokali nowych o nowoczesnych oknach. Należy zauważyć, że jakość dopasowania danych modelowych do pomiarowych nie zmienia się z uwagi na panujące stężenia pyłów zawieszonych, co pozwala wnioskować, że stężenie pyłów nie ma wpływu na współczynniki filtracji dla danego lokalu.

W przypadku lokalizacji w domu w Kościelisku wyznaczono dwa zestawy parametrów ponieważ podczas trwania pomiarów zmieniała się charakterystyka budynku. Niestety nie została ona udokumentowana przez użytkowników. Istnieje podejrzenie, że zaczęto używać w pomieszczeniach ogrzewania kominkiem. Z uwagi na wysoką wartość współczynnika dopasowania (0.55) tę część pomiarów musimy odrzucić. Podobnie jak pomiary w Zarzycach Wielkich gdzie również używany był kominek, jednak odmiennie niż w Skale był on rozpalany wyłącznie na kilka godzin w ciągu dnia, co prowadziło do występowania chwilowych stężeń pyłów wewnątrz pomieszczeń znacznie wyższych niż na zewnątrz, utrzymujących się do 6 godzin. Również w tym przypadku współczynnik dopasowania (0.5) pozwala odrzucić otrzymane wyniki. Wyniki pochodzące z lokalizacji przy ul. Strzelców są mało wiarygodne (współczynnik dopasowania równy 0.3), zaobserwowano bardzo wyraźne wzrosty stężeń pyłów zawieszonych podczas stosowania nebulizatora. Zaznaczyć należy, że zarówno urządzenie montowane na zewnątrz jak i wewnątrz pomieszczeń wyposażone były w podgrzewany wlot powietrza mający na celu eliminację frakcji ciekłej aerozoli. Prawdopodobnie po odparowaniu wody z rozpylanych przez nebulizator kropli w powietrzu pozostawały drobiny soli które mierzone były przez urządzenie. Co interesujące podwyższone stężenia pyłów zawieszonych po wyłączeniu nebulizatora obserwowano w niewietrzoną pomieszczeniu do 8 godzin.

Podczas prowadzenia pomiarów postanowiono przeprowadzić dwa kontrolowane eksperymenty mające pokazać wpływ czynników takich jak typ frakcji pyłów zawieszonych oraz tempo wymiany powietrza na ilość zanieczyszczeń przedostających się do wnętrza pomieszczeń.

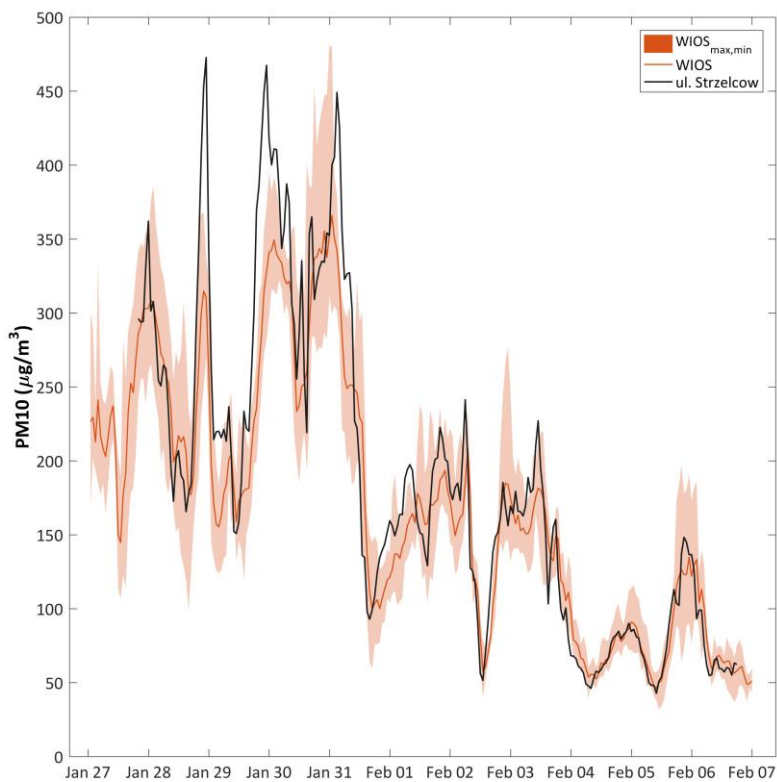
W pierwszym przypadku przeprowadzono dwa testy, pierwszy miał miejsce w lokalu przy ul. K. Wierzyńskiego, gdzie wykonano pomiary pyłów PM10 oraz PM2.5. Pomiary prowadzone były w następujących po sobie tygodniach (frakcje nie były mierzone jednocześnie z uwagi na ograniczenia sprzętowe). Drugi test przeprowadzono w domu w Balicach gdzie zainstalowano na tydzień dwa urządzenia mierzące jednocześnie wszystkie trzy frakcje pyłów zawieszonych (PM10, PM2.5, PM1). Oba testy wykazały że nie ma żadnych statystycznych różnic pomiędzy wyznaczonymi współczynnikami dla odmiennych frakcji pyłów zawieszonych. Oznacza to że pyły są usuwane podczas przedostawania się do pomieszczenia z taką samą wydajnością charakterystyczną dla danego lokalu niezależnie od wielkości cząstek.

Sprawdzenie wpływu dynamiki wymiany powietrza w lokalu na współczynniki filtrowania przeprowadzono w mieszkaniu przy ul. K. Wierzyńskiego. Urządzenia pomiarowe

lokalizowane były w taki sam sposób, zmieniały się wyłącznie nastawy wentylacji mechanicznej oraz nawiewników w oknach. W pierwszym przypadku nawiewniki pozostawały zamknięte oraz włączony był jeden z wiatraków wyciągowych na 50% mocy. W drugim przypadku moc wiatraków pozostała bez zmian natomiast otwarto wszystkie nawiewniki w oknach. Podczas ostatniego pomiaru nawiewniki pozostały otwarte natomiast włączono drugi wiatrak również na 50% mocy. Różnice we współczynnikach zaobserwować możemy w tabeli 1 w punktach 1, 16 oraz 17. Zauważyć można, że otwarcie nawiewników spowodowało niewielki spadek wartości średniego czasu przebywania powietrza w lokalu (wzrosło tempo wymiany powietrza) oraz spadek współczynnika filtrowania o około 10%. Można stąd wysunąć wniosek, że 90% powietrza nadal dostaje się do lokalu nieszczelnościami w oknach itp. natomiast 10% wspomnianymi nawiewnikami, przez które jest dużo gorzej filtrowane. Dwukrotne zwiększenie mocy wentylacji spowodowało wzrost tempa wymiany powietrza w lokalu podobnego rzędu (spadek średniego czasu przebywania z 4 do 2,4 godziny). Wartość współczynnika filtrowania zmniejszyła się jednak tylko o kolejne 10% co pozwala wysnuć wniosek że współczynnik filtrowania nie zależy bardzo silnie od tempa wymiany powietrza.

Dodatkową informacją płynącą z przeprowadzonych pomiarów jest bezwzględny poziom stężeń pyłów zawieszonych PM10 na zewnątrz wybranych lokalizacji. Otrzymane wyniki uśredniono do wartości średnio godzinnych i porównano z wynikami uzyskanymi przez WIOŚ dla całego Krakowa. Brano pod uwagę wyłącznie te lokalizacje, dla których prezentowane wartości stężeń na stacjach WIOŚ w Krakowie są reprezentatywne lub postanowiono porównać stężenia w danej lokalizacji ze średnią sytuacją w Krakowie.

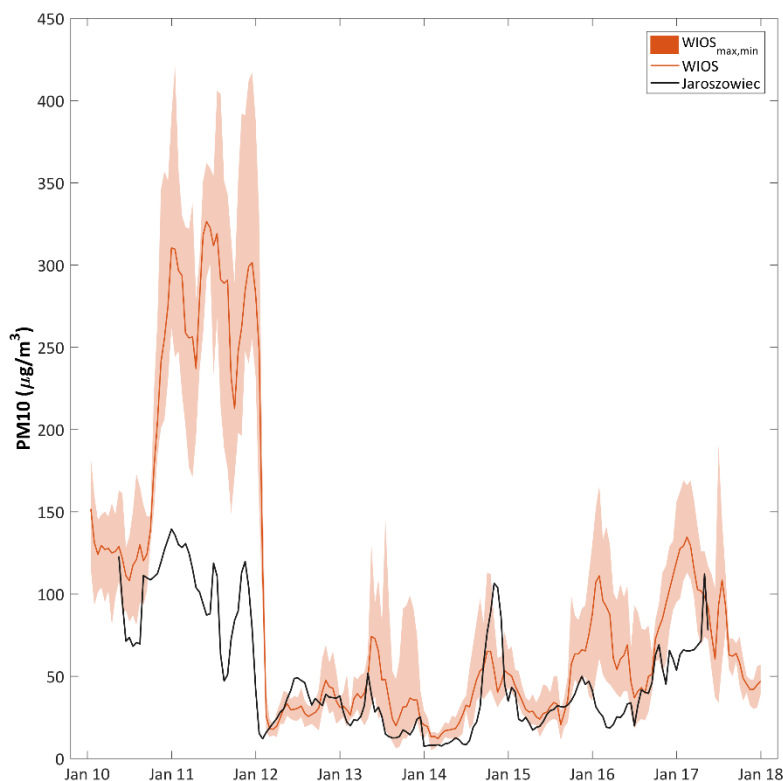
Lokalizacja przy ul. K. Wierzyńskiego została przedstawiona na rys. 6. Z porównania wartości mierzonych podczas kampanii z wartościami raportowanymi przez WIOŚ zaobserwować można że podczas występowania podwyższonych wartości stężeń pyłu w obrębie Krakowa wartości mierzone przy ul. K. Wierzyńskiego są znacząco (czasami niemal dwukrotnie) wyższe niż stężenia na stacjach WIOŚ. Może to świadczyć o występowaniu lokalnych źródeł pyłów zawieszonych (niska emisja) w pobliżu punktu pomiarowego.



Rys. 7. Przebieg stężeń pyłów zawieszonych PM10 na zewnątrz lokalu przy ul. Strzelców w Krakowie (linia czarna) oraz średnia wartość z dostępnych dla danego okresu stacji WIOŚ w Krakowie (linia pomarańczowa) wraz z wartościami minimalnymi oraz maksymalnymi (pomarańczowe cieniowanie) w dniach 27.01-06.02. 2017 r.

Kolejna lokalizacja w obrębie Krakowa to mieszkanie przy ul. Strzelców, z którego wyniki przedstawiono na rys. 7. Wyniki otrzymane z prowadzonych pomiarów bardzo dobrze pokrywają się z wartościami stężeń raportowanymi przez WIOŚ w Krakowie. Dla niższych wartości stężeń (poniżej 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) wartości niemal pokrywają się ze średnią liczoną dla stacji WIOŚ. Dla wartości wyższych występują różnice, które mogą być spowodowane dynamiką emisji w obrębie miasta.

Wartości zmierzone w szpitalu w Jaroszewcu przedstawiono na rys. 8. Otrzymane wyniki postanowiono porównać z wartościami stężeń pyłu zawieszonego raportowanymi przez

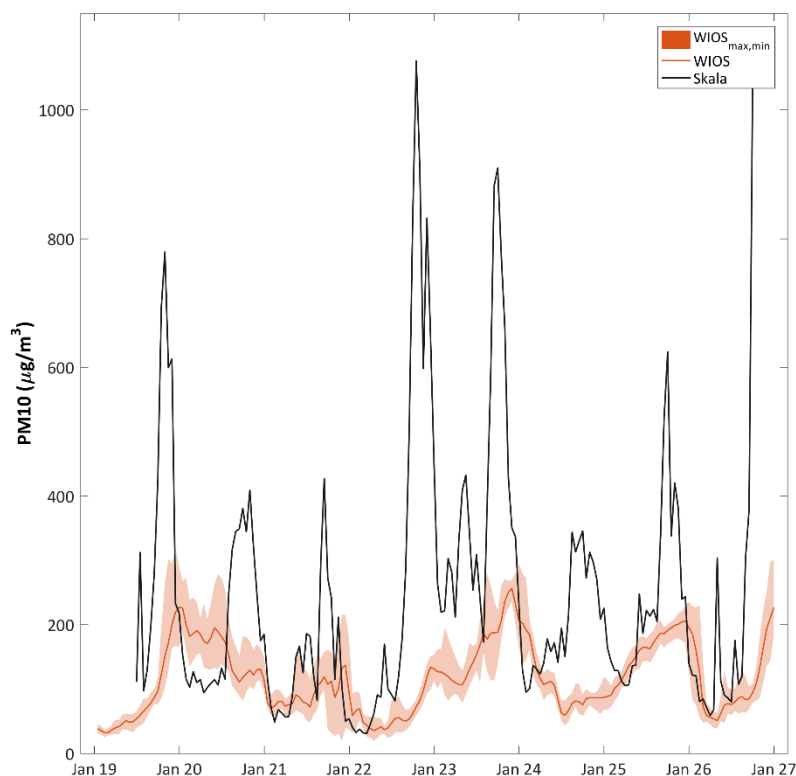


Rys. 8. Przebieg stężeń pyłów zawieszonych PM10 na zewnątrz budynku w Jaroszewcu (linia czarna) oraz średnia wartość z dostępnych dla danego okresu stacji WIOŚ w Krakowie (linia pomarańczowa) wraz z wartościami minimalnymi oraz maksymalnymi (pomarańczowe cieniowanie) w dniach 10-17.01.2017 r.

WIOŚ dla Krakowa z uwagi na występowanie w obrębie miasta sytuacji ekstremalnej dnia 11.01.2017 roku. Przez większą część okresu pomiarowego stężenia pyłu zawieszonego w Jaroszewcu są na poziomach podobnych bądź niższych niż stężenia w Krakowie. Podczas występowania w Krakowie ekstremalnych wartości stężeń (około $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$) w dniach 10-11.01.2017 r. stężenia w Jaroszewcu pozostały na poziomie sprzed wystąpienia ekstremum w Krakowie ($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Stężenia pyłów zawieszonych PM10 w miejscowości Skała w okresie prowadzenia pomiarów przekraczały $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (por. rys. 9), w tym samym okresie wartości stężeń w obrębie Krakowa nie przekroczyły $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$. W trakcie trwania pomiarów występowały okresy, dla których stężenia średnio godzinne w Skale oraz w Krakowie były na podobnym poziomie. Może to oznaczać że w tym czasie powietrze w obrębie województwa było

dobrze wymieszane. W dniach 20-21.01.2017 r. w obrębie Krakowa występowały wiatry powyżej 2m/s, podobnie 24.01.2017 r.



Rys. 9. Przebieg stężeń pyłów zawieszonych PM10 na zewnątrz budynku w Skale (linia czarna) oraz średnia wartość z dostępnych dla danego okresu stacji WIOŚ w Krakowie (linia pomarańczowa) wraz z wartościami minimalnymi oraz maksymalnymi (pomarańczowe cieniowanie) w dniach 10-17.01.2017 r.

WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów stwierdzić można że stężenia pyłu zawieszonego wewnątrz budynków pochodzące z przedostawania się pyłu z zewnątrz są średnio o 50% niższe aniżeli stężenia na zewnątrz. Wartość redukcji stężeń zależy bardzo silnie od kondycji budynku oraz rodzaju wentylacji. Pokazano również, że pył przedostaje się do budynku niezależnie od wielkości frakcji. Tempo wymiany powietrza zdaje się nie mieć kluczowego znaczenia dla ilości pyłu przedostającego się do danego pomieszczenia.

Z uwagi na obserwowane zależności oraz wyraźną redukcję stężeń pyłów wewnątrz budynków można przyjąć, iż wietrzenie pomieszczeń ma pozytywny wpływ na poprawę jakości powietrza wewnątrz tylko w przypadkach gdy stężenia na zewnątrz uległy gwałtownemu spadkowi i są znacząco niższe niż stężenia pyłów w pomieszczeniach. Przy czym zaznaczyć należy iż dotyczy to wyłącznie problemu pyłów zawieszonych i nie brano pod uwagę zanieczyszczeń gazowych powstających wewnątrz pomieszczeń takich jak formaldehyd czy radon.

Dodatkowe wnioski płynące z przeprowadzonych badań dotyczą sposobu użytkowania kominków. Doraźne użytkowanie kominka oraz proces jego rozpalania może mieć bardzo niekorzystny wpływ na jakość powietrza wewnątrz pomieszczeń.

REFERENCJE

Dziennik Ustaw Rzeczypospolitej Polskiej, Warszawa, dnia 18 września 2012 r., Poz. 1031; rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 24 sierpnia 2012 r. w sprawie poziomów niektórych substancji w powietrzu

AirNow; https://www.airnow.gov/index.cfm?action=particle_health.index, dostęp 01.07.2017 r.

Główny Inspektorat Ochrony Środowiska (GIOŚ), <http://www.gios.gov.pl/pl/aktualnosci/294-normy-dla-pylow-drobnych-w-polsce>, dostęp 01.07.2017 r.

Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska w Krakowie (WIOŚ Kraków), <http://monitoring.krakow.pios.gov.pl/indeks-jakosci-powietrza>, dostęp 01.07.2017 r.

Ando M., Tamura K., Katagiri K. (1991). Study on suspended particulate matter and polycyclic aromatic hydrocarbons in indoor and outdoor air. *Occupational and Environmental Health* 63, 297-301.

Estokova A., Stevulova N., Kubincova L. (2010). Particulate matter investigation in indoor environment. *Global NEST Journal* 12, 20-26.

Branis M., Safranek J., Hytychova A. (2011). Indoor and outdoor sources of size-resolved mass concentration of particulate matter in a school gym – implications for exposure of exercising children. *Environ Sci Pollut Res*, 18, 598-609.