

Poprawa jakości powietrza w pomieszczeniach za pomocą oczyszczacza powietrza zdolnego do redukcji aerozolu cząstek stałych (PM) i lotnych związków organicznych (VOC): Wyniki badań

Paola Fermo*^{1,2}, Begoña Artíñano³, Gianluigi De Gennaro^{2,4}, Antonio Marco Pantaleo⁵, Alessandro Parente⁵, Fiorella Battaglia⁷, Elena Colicino⁸, Gianluca Di Tanna⁹, Andouglas Goncalves da Silva Junior¹⁰, Igor Gadelha Pereira¹¹, Gabriel Santos Garcia¹², Luiz Marcos Garcia Goncalves¹³, Valeria Comite¹ i Alessandro Miani^{2,14}

1. Wydział Chemii, Uniwersytet w Mediolanie, Mediolan, 20133, Włochy;
2. Włoskie Towarzystwo Medycyny Środowiskowej, (SIMA), Mediolan, 20123, Włochy;
3. Centrum Energii, Środowiska i Technologii (CIEMAT), Madryt, Hiszpania
4. Wydział Biologii, Uniwersytet "Aldo Moro" w Bari, Bari, Włochy
5. Centrum Inżynierii Systemów Procesowych, Imperial College, Londyn, Wielka Brytania
6. Université Libre de Bruxelles, Ecole polytechnique de Bruxelles, Bruxelles, Belgia
7. Uniwersytet Ludwiga Maximiliana, Monachium, Niemcy
8. Szkoła Medyczna Icahn'a Mount Sinai, Nowy Jork, USA
9. George Institute for Global Health, Wydział Lekarski, Uniwersytet Nowej Południowej Walii, Sydney, Australia
10. Federalny Instytut Rio Grande do Norte, Mossoro, RN, Brazylia.
11. Centrum Badań i Rozwoju Telekomunikacji (CPQD), Campinas, SP, Brazylia.
12. Instytut Nauk Biologicznych, Uniwersytet Brasilia, Brazylia.
13. Uniwersytet Federalny Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brazylia.
14. Wydział Nauk o Środowisku i Polityki Środowiskowej, Uniwersytet w Mediolanie, Mediolan, Włochy

Streszczenie: Niekorzystny wpływ drobnych cząstek stałych i wielu lotnych substancji organicznych na zdrowie człowieka jest dobrze znany. Drobne cząstki są w rzeczywistości najbardziej zdolne do głębokiego wnikania do układu oddechowego. Ludzie spędzają większość czasu w pomieszczeniach zamkniętych, gdzie stężenia niektórych zanieczyszczeń są czasami wyższe niż na zewnątrz. Dlatego istnieje potrzeba zapewnienia zdrowego środowiska wewnętrznego i w tym celu zastosowanie oczyszczacza powietrza może być cenną pomocą, szczególnie teraz, gdy wykazano, że jakość powietrza w pomieszczeniach ma duży wpływ na rozprzestrzenianie się infekcji wirusowych, takich jak ta spowodowana SARS-COVID19. W tym badaniu przetestowaliśmy system, który może być używany jako oczyszczacz powietrza. W szczególności sprawdzono jego skuteczność w redukcji stężenia PM₁₀ (cząstki o średnicy aerodynamicznej mniejszej niż 10 μm), PM_{2.5} (cząstki o średnicy aerodynamicznej mniejszej niż 2.5 μm), PM₁ (cząstki o średnicy aerodynamicznej mniejszej niż 1 μm) oraz liczby cząstek w zakresie 0.3 μm - 10 μm. Ponadto sprawdzono również jego zdolność do redukcji stężenia lotnych związków organicznych (VOCs). Pomiary PM przeprowadzono za pomocą przenośnego urządzenia OPC (optical particle counter) symulującego warunki pracy typowe dla środowiska domowego. W szczególności wykazaliśmy, że badany oczyszczacz powietrza znacząco zredukował stężenie zarówno PM₁₀ jak i PM_{2,5} odpowiednio 16,8 i 7,25 razy, co odpowiada redukcji o ponad 90% i 80%. Zaobserwowano również wyraźne obniżenie stężenia lotnych związków organicznych (VOCs), gdyż uzyskano spadek stężenia tych substancji gazowych o ponad 50%.

Słowa kluczowe: oczyszczacz powietrza; pył zawieszony; jakość powietrza w pomieszczeniach

1. Wprowadzenie

Jakość powietrza wewnątrz pomieszczeń (IAQ) (w domach, szkołach, biurach i ogólnie w miejscach pracy) ma ogromne znaczenie, ponieważ ludzie spędzają większość czasu, około 80%, w zamkniętych pomieszczeniach. Duża liczba badań w literaturze koncentruje się na niekorzystnym wpływie tych zanieczyszczeń na zdrowie człowieka, tutaj wymieniono tylko niektóre z najnowszych [1-8]. Istnieją również kategorie osób szczególnie wrażliwych, takie jak dzieci, osoby starsze, a zwłaszcza osoby z określonymi chorobami, dla których zapewnienie zdrowego środowiska staje się jeszcze ważniejsze. Na przykład dzieci, które spędzają większość czasu w szkole, są stale narażone na działanie zanieczyszczeń wewnątrz pomieszczeń [9], nawet jeśli cząsteczki pochodzą głównie ze źródeł zewnętrznych [10-13]. Wiele zanieczyszczeń może być obecnych w pomieszczeniach zamkniętych [14] i mogą one zarówno przenikać z zewnątrz jak i być emitowane z określonych źródeł wewnętrznych, które są związane z różnymi czynnościami (na przykład sprzątanie, stosowanie produktów takich jak odświeżacze powietrza, gotowanie potraw, spalanie paliw, spalanie biomasy, itp.) Wśród zanieczyszczeń, które mają najbardziej niekorzystny wpływ na zdrowie człowieka, należy wymienić zarówno pył zawieszony (PM), jak i lotne związki organiczne (VOC).

Jak powszechnie wiadomo, prawne wartości graniczne są ustalone dla różnych zanieczyszczeń dla środowiska zewnętrznego lub otoczenia. Z drugiej strony, dla środowisk wewnętrznych istnieją tylko wartości graniczne dla środowisk pracy, podczas gdy istnieją tylko pewne sugerowane wartości docelowe dla przestrzeni wewnętrznych. W tych zaleceniach i regulacjach zwykle odnosi się do wymiany powietrza na godzinę (ACH), a celem jest obniżenie stężenia CO₂ poniżej określonych poziomów. Na przykład, wartości CO₂ powyżej 1000 ppm w pomieszczeniach zamkniętych są znane z obniżania zdolności poznawczych [2]. Ogólnie rzecz biorąc, WHO zaleca limity szkodliwych dla zdrowia stężeń kluczowych zanieczyszczeń powietrza zarówno na zewnątrz, jak i wewnątrz domów, biorąc pod uwagę wiele dowodów naukowych. W 2010 r. WHO wydała specjalne wytyczne dotyczące jakości powietrza w pomieszczeniach [15]. W USA Agencja Ochrony Środowiska (EPA) wykazała, że jakość powietrza w pomieszczeniach zamkniętych jest 5-10 razy gorsza niż na zewnątrz.

Zaniedbany temat jakości powietrza w pomieszczeniach został wyjątkowo mocno zaakcentowany ze względu na obecną pandemię COVID-19 wywołaną ogólnosiątkowym rozprzestrzenieniem się nowego koronawirusa SARS-COV2, począwszy od Wuhan (Chiny) pod koniec 2019 roku. Dla naukowców, którzy badali dyfuzję SARS-COV2, natychmiast stało się jasne, że korelacja z cząstkami unoszącymi się w powietrzu zarówno na zewnątrz, jak i w pomieszczeniach [16-18]. Powszechnie wykazano, że jakość powietrza w pomieszczeniach odgrywa ważną rolę w rozprzestrzenianiu się koronawirusa, jak również w zwiększaniu ładunku wirusowego, co może prowadzić do śmiertelnych objawów. Jakość powietrza w pomieszczeniach zamkniętych stanowi wyzwanie, ponieważ wydaje się być nawet bardziej istotna niż zachowanie odległości między ludźmi. Miejsca publiczne takie jak supermarkety, restauracje, sklepy, biura itp. natychmiast przyjęły środki bezpieczeństwa w celu utrzymania dystansu społecznego i zachęcania do wymiany powietrza tam gdzie to możliwe. Środki te rzeczywiście mają ograniczyć przenoszenie wirusa drogą powietrzną w środowiskach zamkniętych, gdzie odległości są mniejsze. Jednakże, niewiele badań oceniało szczegółowo sposób rozprzestrzeniania się SARS-COV2 w środowiskach wewnętrznych. W jednym z ostatnich badań zajęto się kwestią ryzyka zakażeń spowodowanych SARS-Cov-2 w perspektywie opracowania modelu, który mógłby być stosowany w środowiskach zamkniętych [19]. Równocześnie wzrasta zainteresowanie oceną urządzeń i technologii, które mogą poprawić jakość powietrza w pomieszczeniach, takich jak rozważane w niniejszej pracy.

W celu zapewnienia zdrowego środowiska w pomieszczeniach często stosuje się urządzenia oczyszczające powietrze, a wykorzystanie systemów filtracji powietrza jest coraz powszechniejsze i szybko rośnie, przyczyniając się do poprawy jakości powietrza [20-22].

PM₁₀ (cząstki o średnicy aerodynamicznej mniejszej niż 10 μm), PM_{2,5} (cząstki o średnicy aerodynamicznej mniejszej niż 2,5 μm) i PM₁ (cząstki o średnicy aerodynamicznej mniejszej niż 1 μm) należą do najbardziej szkodliwych zanieczyszczeń powietrza wraz z gazami takimi jak ozon, tlenki azotu i tlenki siarki.

Poziomy stężenia PM_{2,5} w powietrzu atmosferycznym przekroczyły w 2015 r. cel ustanowiony przez WHO na 75% stacji w Regionie Europejskim, a ekspozycja na PM skraca średnią długość życia o prawie 1 rok, głównie z powodu zwiększonego ryzyka chorób układu krążenia i oddechowego oraz raka płuc (<https://www.who.int/>).

Ważne jest wskazanie, że skład chemiczny PM, który został szeroko zbadany [24-30], jest kolejnym kluczowym czynnikiem, który powinien być brany pod uwagę, gdy rozważany jest niekorzystny wpływ aerozolu pyłowego na zdrowie człowieka. Należy również rozważyć specjację chemiczną różnych zakresów wielkości i rozkład różnych składników pomiędzy powierzchnią i masą cząstek [26]. Niemniej jednak, badania takie są zwykle prowadzone w środowisku zewnętrznym. Do najczęściej kontrolowanych zanieczyszczeń wewnętrznych należą PM (o różnych rozmiarach) i TVOC (całkowite lotne związki organiczne), ponieważ ich specjacja jest raczej trudna do uzyskania.

Aby zagwarantować bezpieczne środowisko, do kontroli jakości powietrza w pomieszczeniach stosuje się ostatnio inteligentne technologie oparte na różnych czujnikach [31].

W tym badaniu testowano oczyszczacz powietrza w celu oceny zdolności do redukcji stężenia PM i TVOCs. Jeśli chodzi o monitorowanie PM, ocena została przeprowadzona przy użyciu przenośnego optycznego licznika cząstek i symulacji warunków domowych. Za pomocą tego urządzenia mierzono stężenie masowe PM (PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁) oraz stężenie liczbowe cząstek w 7 frakcjach wielkości od 0,3 µm do 10 µm. TVOCs były oznaczane ilościowo przez specjalny czujnik oparty na zasadzie fotojonizacji.

2. Materiały i metody

Badaniom poddano urządzenie do oczyszczania powietrza, a mianowicie urządzenie HYLA-EST.

Urządzenie to oparte jest na systemie filtracji w kąpeli wodnej, przez którą powietrze jest przetłaczane bez użycia jakiegokolwiek innego rodzaju filtra. W ten sposób jest w stanie wychwycić cząstki powszechnie występujące w środowisku domowym, takie jak kurz i cząstki biotyczne, w tym alergeny, bezpośrednio do wody. Może być stosowany zarówno jako odkurzacz jak i oczyszczacz powietrza. Separator pozwala na powrót do środowiska czystego, oczyszczonego wodą powietrza.

W celu potwierdzenia skuteczności działania urządzenia HYLA-EST przeprowadzono pomiary w pomieszczeniu mieszkania o wymiarach 4mx4mx2,5m (co odpowiada 40 m³). Pomiary przeprowadzono w dniu 15 października 2020 roku.

2.1 Pomiary PM

W celu przeprowadzenia pomiarów PM zastosowano przenośne urządzenie P-DustMonit (Contec, Mediolan, Włochy). Urządzenie to jest optycznym licznikiem cząstek (OPC) umożliwiającym ciągłe monitorowanie stężenia cząstek (posegregowanych pod względem wielkości) w powietrzu. Więcej szczegółów dotyczących przyrządu podano w pracy Fermo et al. [18]. Przepływ powietrza w przyrządzie wynosi 1 L/min, a urządzenie może pracować w zakresie temperatur 10 °C-40 °C. Urządzenie pozwala na pomiar stężeń masowych cząstek wyrażonych jako PM₁₀, PM_{2.5} i PM₁ w µg/m³ (w czasie rzeczywistym i jednocześnie); ponadto stężenie liczbowe cząstek jest również mierzone w czasie rzeczywistym z podziałem wielkości cząstek na 7 klas wymiarowych, począwszy od cząstek o średnicy >0,3 µm do cząstek o średnicy <10 µm. Pomiary przeprowadzono umieszczając przyrząd wewnątrz pomieszczenia w mieszkaniu o kubaturze około 40 m³. Przed rozpoczęciem badań pomieszczenie było wentylowane powietrzem zewnętrznym i oczekiwano stabilizacji warunków, tzn. osiągnięcia plateau trendu krzywych względem trzech interesujących nas frakcji (PM₁₀, PM_{2.5} i PM₁). Warto zauważyć, że optyczne liczniki cząstek, takie jak ten zastosowany w niniejszej pracy, są często wykorzystywane do śledzenia jakości powietrza i ilościowego oznaczania cząstek [31-32]. Ponadto, wysoka rozdzielczość czasowa pozwala na badanie w czasie rzeczywistym ewolucji konkretnych zdarzeń zanieczyszczeń.

2.2 Pomiar LZO

Do pomiaru stężenia całkowitych lotnych związków organicznych (Total Volatile Organic Compounds - TVOC) wykorzystano urządzenie Netpid (Lab Service Analytics). Jest to czujnik LZO oparty na systemie fotojonizacji i zdolny do wykrywania szerokiego zakresu LZO o masie cząsteczkowej wyższej niż metan (który z tego powodu nie jest wykrywany). W celu potwierdzenia skuteczności urządzenia i jego powtarzalności przeprowadzono serię testów wstępnych, rozpraszając w pomieszczeniu coraz większe stężenia lotnych związków organicznych. Do tego celu użyto komercyjnego rozpuszczalnika do paznokci (dalsze szczegóły na ten temat podano w dalszej części tekstu). Stwierdzono, że urządzenie jest powtarzalne. Ponadto granica wykrywalności jest znacznie niższa niż minimalne stężenia typowo wykrywalne w środowisku wewnętrznym (średnio pomiędzy 0,1 a 0,2 ppm), podczas gdy maksymalne wykrywalne stężenie deklarowane przez konstruktora wynosi 3 ppm.

3. Wyniki i dyskusja

Ocena poprawy jakości powietrza w pomieszczeniach poprzez zastosowanie systemów filtrujących powietrze na różne sposoby jest tematem poruszonym w niektórych badaniach opisywanych w literaturze [22, 33, 34].

Ponadto, ze względu na sytuację pandemii COVID-19, więcej uwagi poświęca się kwestii jakości powietrza w pomieszczeniach [16-19] i z tego powodu bada się skuteczność systemów oczyszczania powietrza, takich jak ten zwalidowany w niniejszym badaniu, ponieważ systemy te mogą wnieść rzeczywisty wkład w poprawę jakości powietrza w pomieszczeniach zamkniętych.

Efektywność tego rodzaju systemów oczyszczania powietrza jest badana przy użyciu urządzeń, które obejmują tanie czujniki, inteligentne czujniki lub optyczne liczniki cząstek do wykrywania cząstek stałych [22, 34, 36].

W celu oceny skuteczności rozpatrywanego w niniejszej pracy oczyszczacza powietrza w redukcji stężenia PM i lotnych związków organicznych (LZO) w typowym środowisku domowym, przeprowadzono serię pomiarów oceniających stężenie zarówno PM, jak i LZO przed włączeniem urządzenia oraz w trakcie jego pracy. W tym celu do pomieszczenia sztucznie wprowadzono zanieczyszczenia poprzez eksperymenty, podczas których w pomieszczeniu rozproszono kurz i wprowadzono lotne związki organiczne, jak podano wcześniej.

3.1 Pomiar zdolności do zmniejszania stężenia pyłu zawieszonego (PM)

W celu oceny zdolności oczyszczacza powietrza do zmniejszania stężeń cząstek stałych w powietrzu, wstępnie zmierzono stężenia tła występujące w pomieszczeniu i zarejestrowano 18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ i 7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ odpowiednio dla PM₁₀ i PM_{2.5} (jako wartości średnie zmierzone po 20 minutach stabilizacji stężeń PM). Jak wiadomo, dla środowisk wewnętrznych nie istnieją wartości progowe, mimo że ludzie spędzają większość czasu w zamkniętych pomieszczeniach. W niektórych przypadkach, jak np. w przypadku sal lekcyjnych, podawane są sugerowane wartości orientacyjne [9, 37], takie jak 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ i 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ odpowiednio dla PM₁₀ i PM_{2.5}. Warto zauważyć, że środowisko domowe wybrane do badań w niniejszej pracy charakteryzowało się dość niskimi stężeniami pyłu zawieszonego rzędu sugerowanych limitów dla PM₁₀ i PM_{2.5}. W szczególności, wartości zarejestrowane dla PM_{2.5} są w dobrej zgodzie z wartościami podanymi przez Jeong et al. [38]. W celu oceny skuteczności oczyszczacza powietrza, w pomieszczeniu sztucznie wprowadzono PM. Za pomocą wentylatora, pewna ilość pyłu zawartego w plastikowej torebce została rozproszona w powietrzu, aby uzyskać pożądany wzrost stężenia PM, jak przedstawiono na rysunku 1. W ten sposób uzyskano piki widoczne na rysunku 1. W odniesieniu do pierwszego piku (o godz. 15:04, pik 1 na rys. 1) osiągnięto stężenie PM₁₀ wynoszące około 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Warto zaznaczyć, że urządzenie HYLEA było wyłączone podczas tego pierwszego eksperymentu. Następnie, test został powtórzony (o godzinie 15:34) zawieszając ilość pyłu odpowiadającą 963 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ jako PM₁₀. Drugi test został przeprowadzony z urządzeniem HYLEA włączonym zaraz po rozproszeniu proszku, czekając aż warunki początkowego stężenia PM zostaną przywrócone. Trzeci test wykonano próbując zawiesić podobną do poprzedniej ilość proszku, w tym przypadku 943 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ale tym razem przy wyłączonym urządzeniu. Uwzględniono tylko pyły PM₁₀ i PM_{2.5}, ponieważ stężenie PM₁ było zbyt niskie.

Na podstawie nachylenia krzywych odpowiadających malejącemu stężeniu PM, oszacowano skuteczność oczyszczacza powietrza w redukcji zarówno PM₁₀ jak i PM_{2.5} i porównano, co by się stało, gdyby cząstki, w tym przypadku pył zawieszony w pomieszczeniu, normalnie osiadły. Do oceny spadku stężenia cząstek stałych PM₁₀ i PM_{2.5} wybrano dziesięć i dwie minuty jako czas leżakowania. Ostatecznie, nachylenie krzywej na rysunku 2 wskazujące ewolucję w celu przywrócenia warunków początkowych, gdy urządzenie było wyłączone (pierwszy szczyt na rysunku 2a, który odpowiada szczytowi 1 na rysunku 1), porównano z tym uzyskanym, gdy urządzenie było włączone (drugi szczyt na rysunku 2, który odpowiada szczytowi 2 na rysunku 1). Porównanie to oceniono ilościowo, obliczając parametr S (nachylenie), wyrażony jako:

$$S = \Delta C / \Delta t$$

gdzie:

ΔC = zmiana stężenia PM w $\mu\text{g}/\text{m}^3$ w przedziale czasu

Δt = czas przedziału czasowego

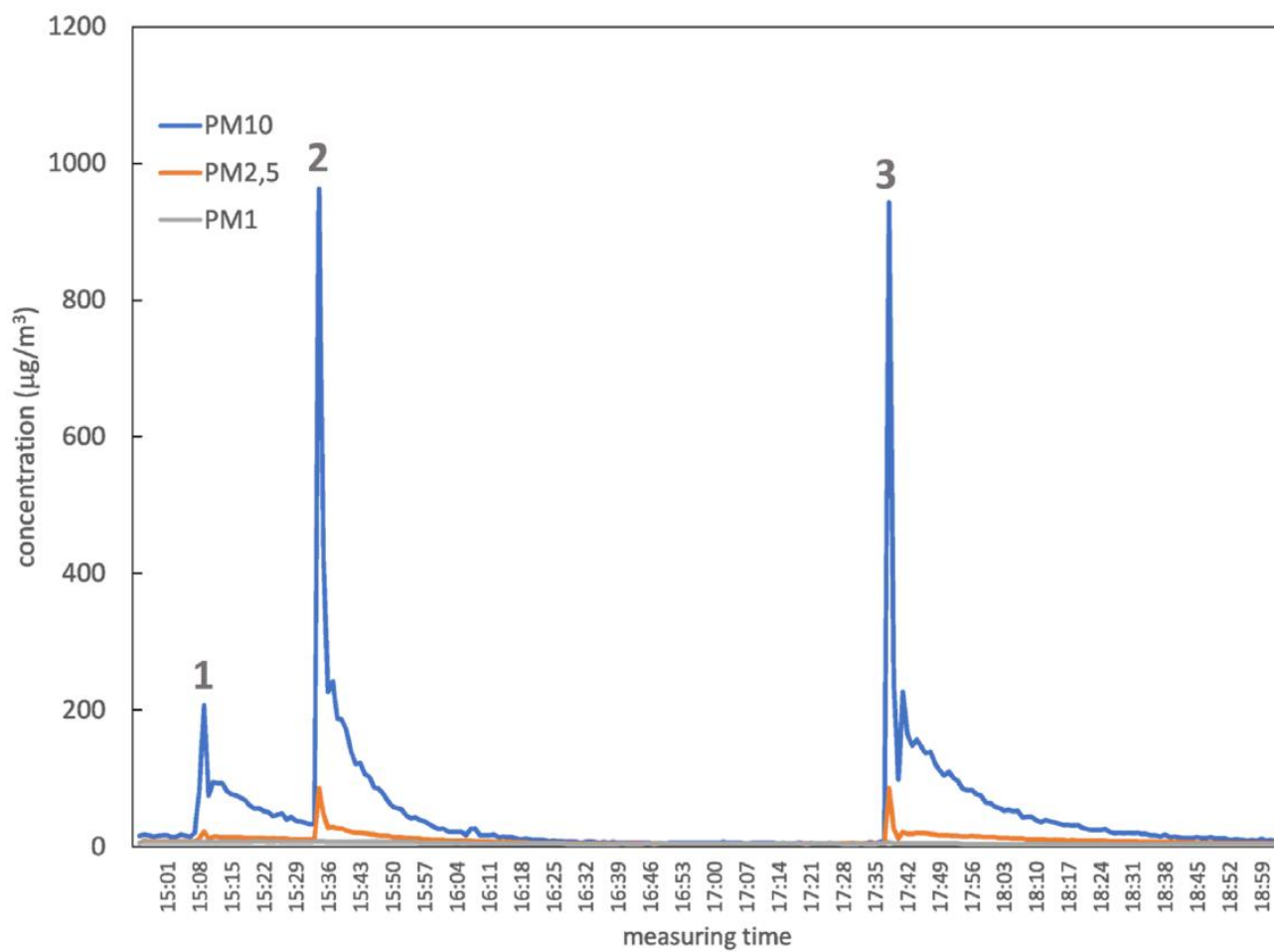
Obliczenia przeprowadzono zarówno dla PM₁₀, jak i PM_{2,5}, biorąc pod uwagę pierwszy i drugi pik odpowiadający odpowiednio wyłączeniu i włączeniu urządzenia. Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 1 i 3. Na rysunkach 2a i 2b pokazano powiększenie pierwszego i drugiego piku.

Tabela 1 - parametry związane z obliczaniem S dla frakcji PM₁₀

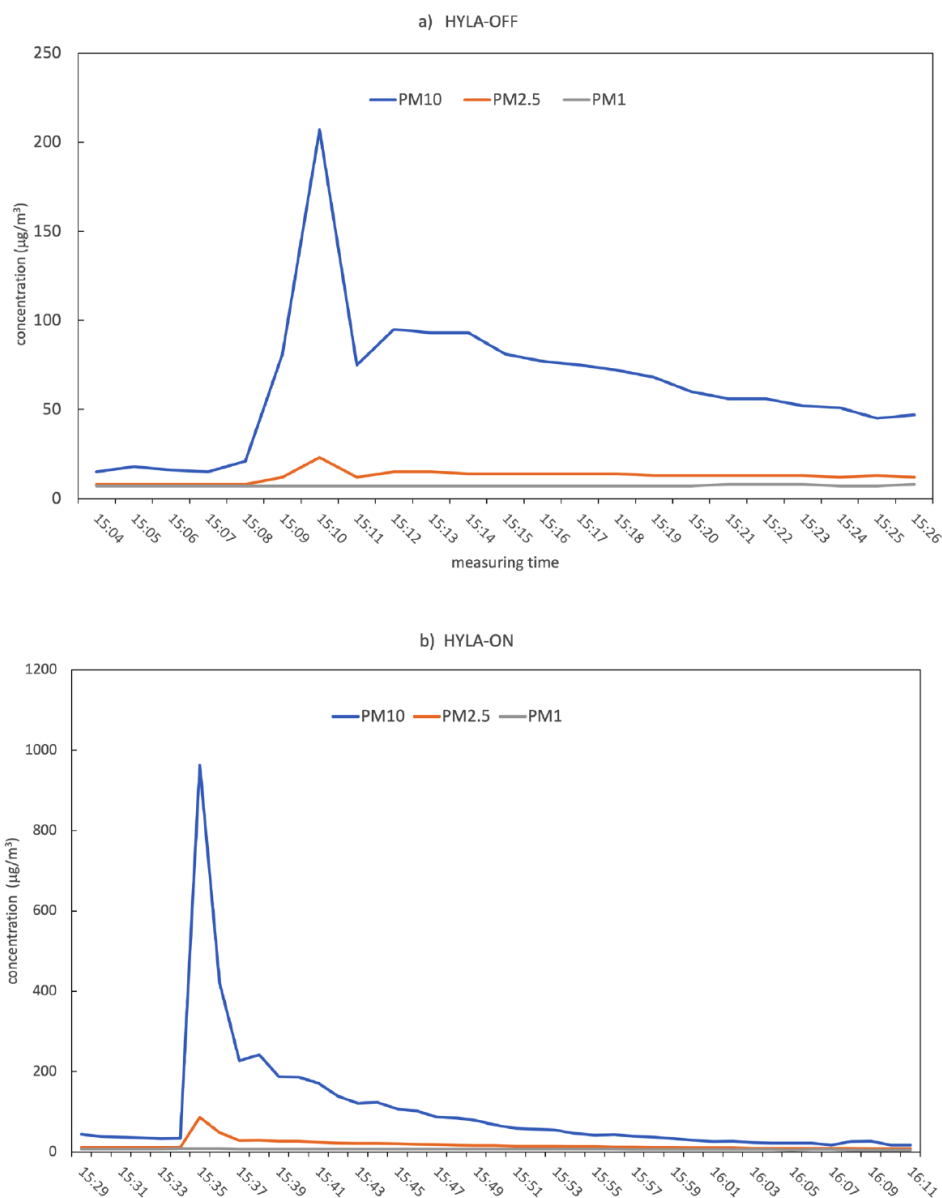
HYLA OFF		
Δt (10 min)	C ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	S
15:11	75	1,9
15:21	56	
HYLA ON		
Δt (10 min)	C ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	S
15:37	421	31,9
15:47	102	

Tabela 2 - parametry związane z obliczaniem S dla frakcji PM_{2.5}

HYLA OFF		
Δt (2 min)	C ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	S
15:10	23	4,0
15:12	15	
HYLA ON		
Δt (2 min)	C ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	S
15:35	86	29,0
15:37	28	



Rysunek 1. Trendy stężeń pyłu PM10, PM2.5 i PM1 w okresie pomiarowym.

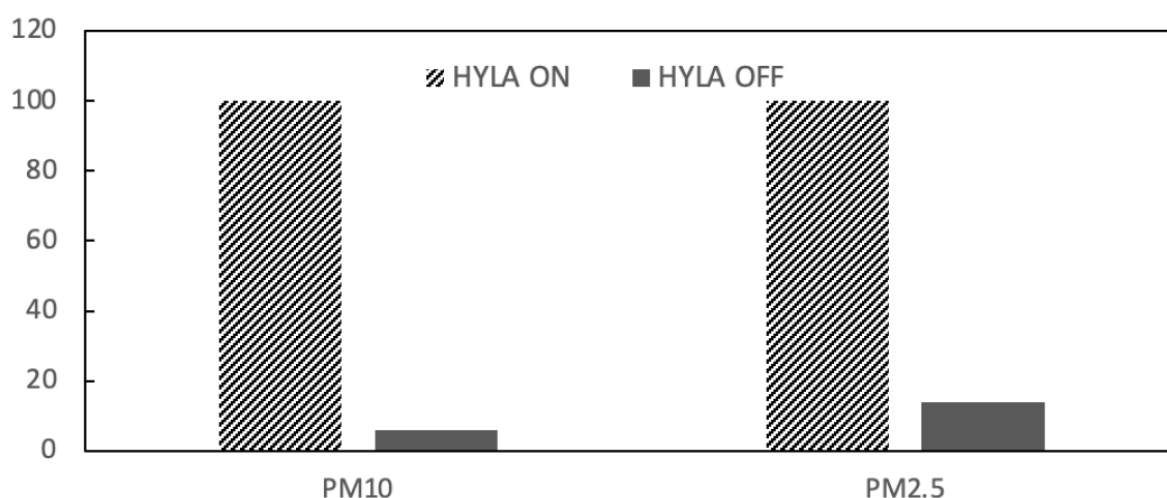


Rysunek 2. Stężenie PM przy wyłączonym (2a) i włączonym (2b) urządzeniu Hyla.

Jeśli chodzi o PM10, zgodnie z wartościami przedstawionymi w Tabeli 1, wartość parametru S była znacznie wyższa, gdy urządzenie było włączone niż wyłączone. Stosunek tych dwóch wartości jest równy 16,8, co wskazuje, że system Hyla jest 16,8 razy bardziej efektywny w redukcji stężenia PM10 w porównaniu do zwykłego osiadania pyłu. Jeśli chodzi o dane dotyczące PM2.5 (Tabela 2), wartość parametru S była także znacznie wyższa przy włączonym systemie Hyla, w porównaniu do przypadku podstawowego.

Stosunek tych dwóch wartości w tym przypadku wynosi 7,25, co oznacza, że system HYLA jest 7,25 razy bardziej efektywny w redukcji stężenia PM_{2.5} w porównaniu do zwykłego odpylania.

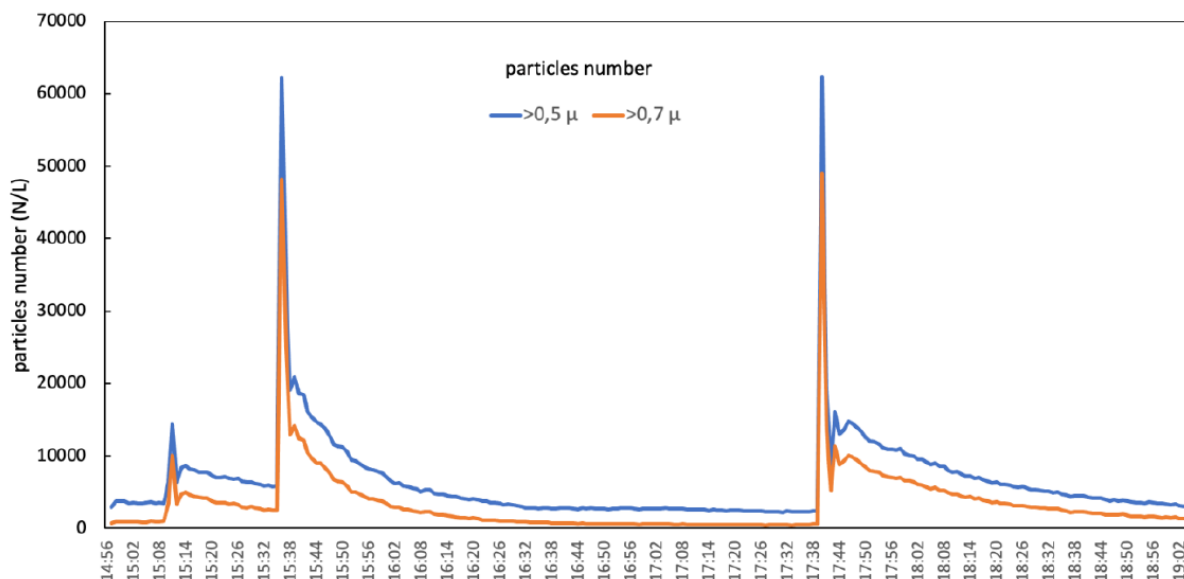
Dla przejrzystości przeprowadzono ponowne obliczenia parametrów S, ustawiając nachylenia uzyskane przy włączonym urządzeniu równe 100. Uzyskane wyniki przedstawiono na rysunku 3, wyraźnie podkreślając wysoką skuteczność oczyszczacza powietrza (niepewność nie była obliczana, ponieważ przedstawione wyniki są wynikami uzyskanymi z trendów PM przedstawionych na rysunku 1). Odpowiada to spadkowi o ponad 90% dla PM₁₀ i ponad 80% dla PM_{2.5}. Wartości te są zgodne z tym, co podali Zhan i inni [21] stosując urządzenia do filtracji powietrza.



Rysunek 3. Względna skuteczność oczyszczacza powietrza HYLA w redukcji PM₁₀ i PM_{2.5} w odniesieniu do naturalnej depozycji pyłu zawieszonego.

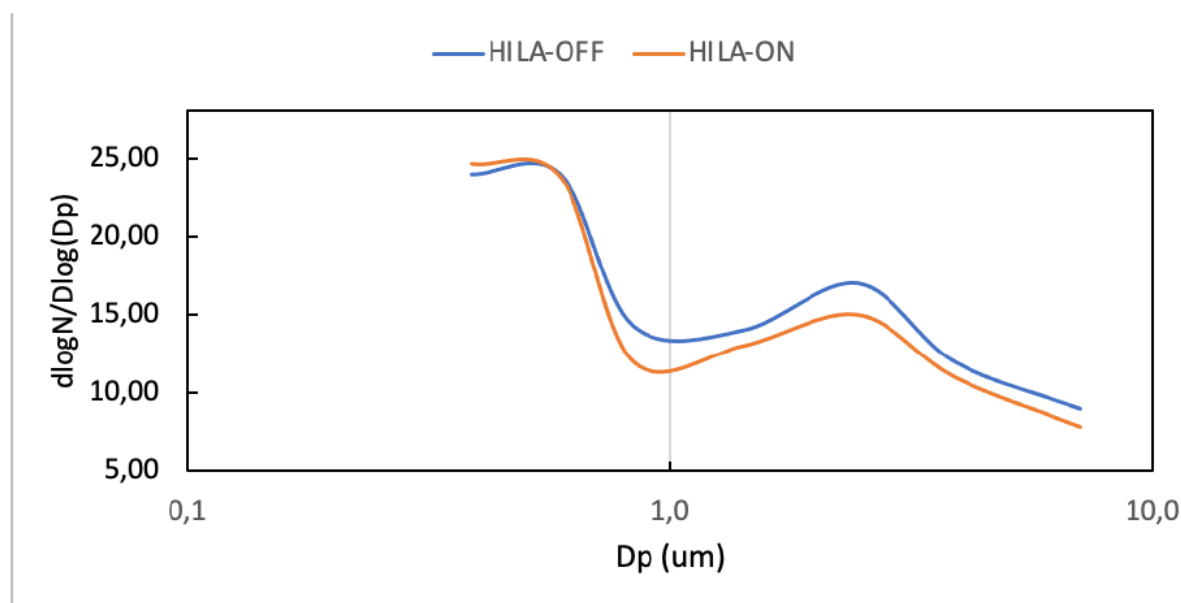
Ponadto zaobserwowano, że urządzenie HYLA pozwala osiągnąć wartości PM początkowo obecne w pomieszczeniu w ciągu 20 minut, zaczynając od bardzo wysokich stężeń PM₁₀. W przypadku braku urządzenia i w tych samych warunkach, 1 godzina byłaby potrzebna do przywrócenia warunków początkowych, co można zaobserwować na rysunku 1.

Rysunek 4 przedstawia trend liczby cząstek (wyrażonej jako N/L) w odniesieniu do dwóch frakcji zawierających najdrobniejsze cząstki, czyli te o średnicy aerodynamicznej większej niż 0,5 μm i 0,7 μm . Można zauważyć, że efekt ten jest bardziej wyraźny w odniesieniu do wartości szczytowej zarejestrowanej o 15:36, tj. przy włączonym urządzeniu HYLA.



Rysunek 4. Stężenie liczby cząstek podczas okresu pomiarowego (N/L= liczba cząstek na litr).

W celu oceny liczby cząstek podczas dwóch eksperymentów z włączonym lub wyłączonym urządzeniem (w tym przypadku rozpatrywano szczyt 2 i 3 z rys. 1), uzyskano krzywe $d\log N/d\log(D_p)$, zaczynając od rozkładu cząstek w 7 klasach wymiarowych. N reprezentuje liczbę cząstek w każdej klasie (mianowicie cząstki o średnicy 0,3-05 μm , 0,5-0-7 μm , 0,7-1 μm , 1-2 μm , 2-3 μm , 3-5 μm , 5-10 μm), natomiast D_p reprezentuje średnicę cząstki). Warto zwrócić uwagę na wyraźny spadek liczby cząstek we frakcji drobnoziarnistej, zwłaszcza w zakresie wielkości 0,7-2,5 μm . Jest to ważny wynik, ponieważ drobna frakcja jest najbardziej niebezpieczna dla zdrowia człowieka. W rzeczywistości, drobniejsza frakcja jest w stanie przeniknąć aż do pęcherzyków płucnych.



Rysunek 5. Rozkład liczby cząstek obliczony jako $d\log N/d\log(D_p)$.

3.2 Pomiar zdolności urządzenia do redukcji stężenia TVOC w powietrzu

W przypadku lotnych związków organicznych (TVOC) podawane są jedynie sugerowane wartości orientacyjne; na przykład wewnątrz sal lekcyjnych zaleca się utrzymanie stężenia poniżej wartości progowej 1000 ppb [9].

Aby ocenić zdolność HYL A do redukcji stężenia TVOC w powietrzu, przeprowadzono serię eksperymentów polegających na wprowadzeniu do środowiska domowego lotnego związku organicznego, takiego jak powszechnie stosowany rozpuszczalnik do paznokci.

Butelka z rozpuszczalnikiem była otwierana na krótsze lub dłuższe okresy czasu, jak opisano poniżej. Butelka była umieszczona w odległości około 30 cm od detektora.

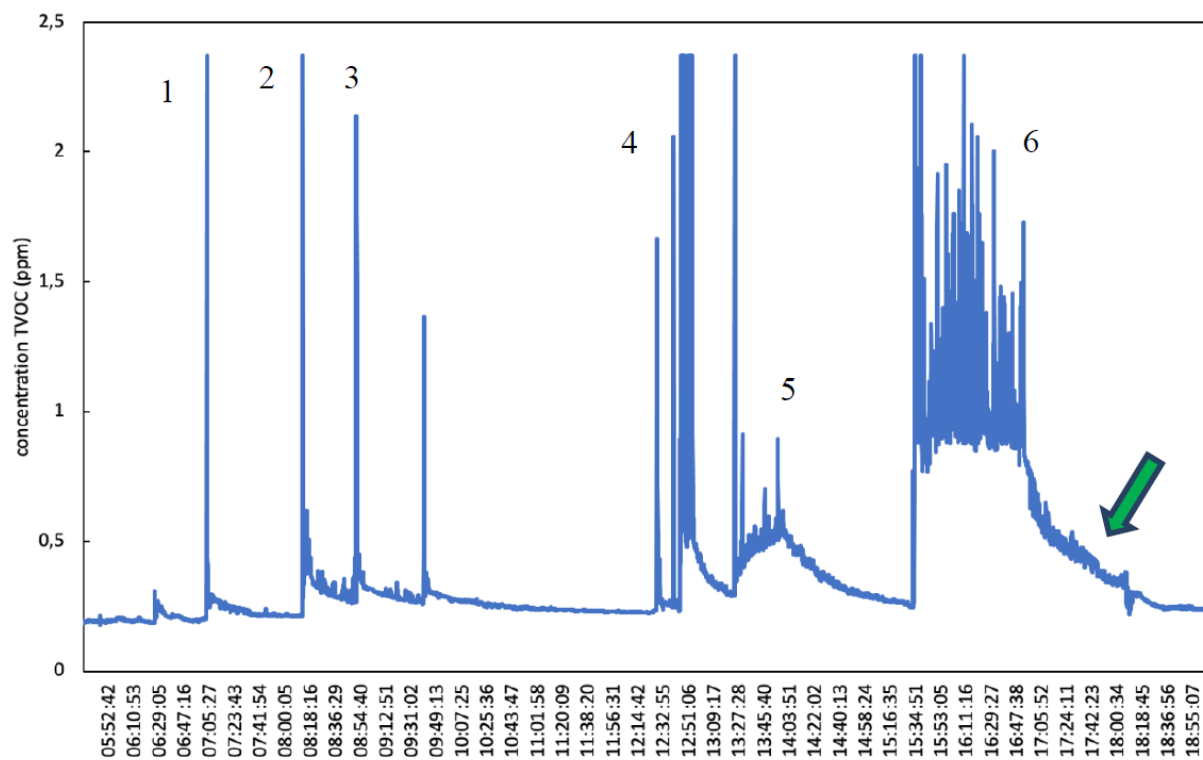
Rysunek 6 przedstawia cały trend TVOC uzyskany podczas okresu pomiarowego (wykonanego w przedziale czasowym 5:34 -19:10 w dniu 15 października 2020 r.).

Instrument Netpid do analizy LZO został wstępnie włączony i ustabilizowany. Średnia wartość stężenia LZO w pomieszczeniu, gdy urządzenie HYL A nie pracowało, wynosiła około 0,2 ppm.

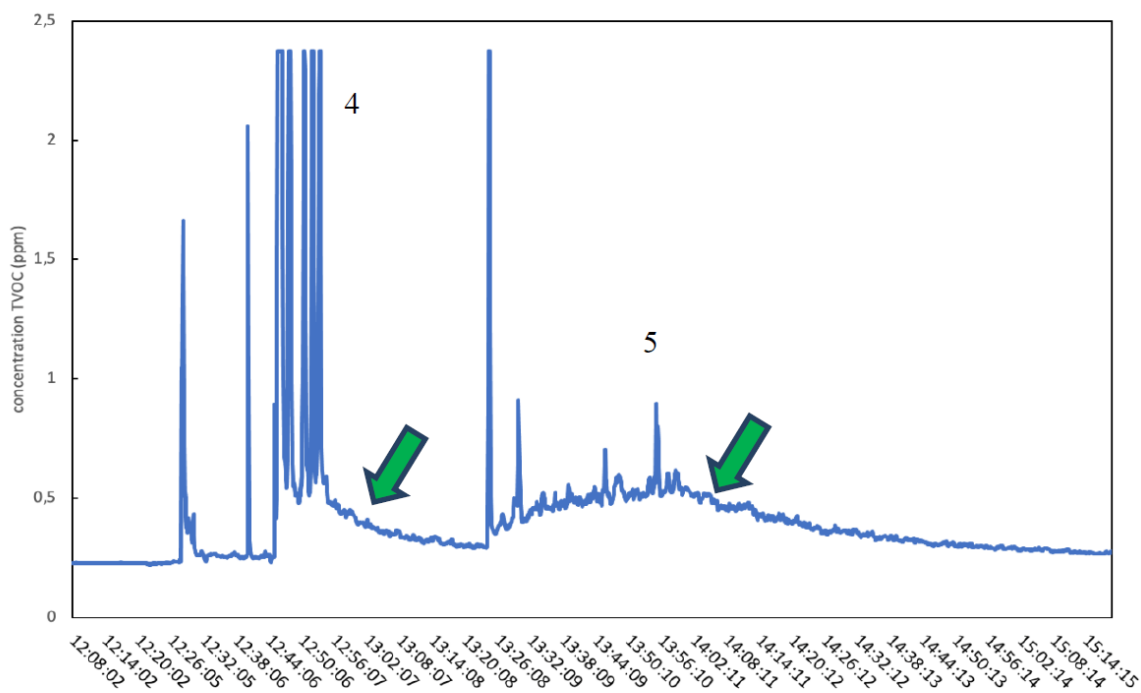
Tabela 3 przedstawia piki przedstawione na rys. 6 i rys. 7, wykryte podczas pomiaru (rys. 7 przedstawia rozszerzoną strefę rys. 7). Dla każdego piku podany jest czas ekspozycji na rozpuszczalnik do paznokci, intensywność piku oraz czy urządzenie HYL A było włączone czy wyłączone.

Pierwszy pik odnosi się do czasu ekspozycji 15 s przy wyłączonym urządzeniu (test został następnie powtórzony uzyskując pik o takiej samej intensywności, pik 2); następnie test został powtórzony z tym samym czasem ekspozycji, ale z włączonym systemem HYL A (pik 3): doprowadziło to do wyraźnego zmniejszenia intensywności piku, czyli około połowy poprzedniego stężenia.

Następnie wybrano przedłużony czas ekspozycji wynoszący 30 minut (pik 4), aby uzyskać bardzo intensywny szeroki pik (poza skalą). O godzinie 12:55 system HYL A został włączony i zaobserwowano wyraźne zmniejszenie piku (pierwsza zielona strzałka po lewej stronie rys. 7). O godzinie 13:25, po ustabilizowaniu się sygnału i utrzymaniu włączonego urządzenia, wykonano nową ekspozycję na okres 30 min (pik 5).



Rysunek 6. Stężenie TVOC w czasie trwania eksperymentu (ppm).



Rysunek 7. Stężenia TVOC podczas eksperymentu (ppm): szczeg. z rys. 6.

W przeciwieństwie do pików 4, w tym przypadku obserwujemy znacznie mniej intensywny sygnał z tylko jednym początkowym pikiem porównywalnym do sygnałów obserwowanych przy wyłączonym urządzeniu, co pokazuje, że HYLA jest bardzo skuteczna w redukcji TVOCs. Wreszcie, czas ekspozycji wynoszący 1h został użyty w celu znacznego zwiększenia stężenia TVOCs w pomieszczeniu (przy wyłączonym urządzeniu HYLA). Interesujące jest to, że po godzinie 16:30 stężenie pozostaje wysokie, nawet jeśli do pomieszczenia nie są wprowadzane żadne dodatkowe lotne związki organiczne. O godzinie 16:48 urządzenie zostało włączone. W ciągu około 2 godzin sygnał osiągnął wartość początkową (patrz obszar oznaczony zieloną strzałką na Rys. 7). Biorąc pod uwagę pik 2 i pik 3 z tabeli 3, można zaobserwować, że uzyskano redukcję intensywności o ponad 40%.

Tabela 3 - Stężenie pików (ppm) zarejestrowane przez urządzenie Netpid w kolejnych przedziałach czasowych i dla różnych czasów ekspozycji rozpuszczalnika do paznokci; dla pików 4, 5 i 6 nie podano intensywności, ponieważ były one poza skalą.

Peak	Exposure time (s)	Peak intensity (ppm)	Operation device
1	15 s	2,37	OFF
2	15 s	2,37	OFF
3	15 s	1,36	ON
4	30 min (12.25-12.55)	broad peak	OFF
5	30 min (13.25-13.55)	broad peak	ON
6	1h (15.30 – 16.30)	broad peak	OFF

4.

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań w zakresie redukcji PM i VOCs można stwierdzić, że **urządzenie HYLA-EST** jest skuteczne zarówno w redukcji stężenia cząstek stałych w powietrzu jak i poziomu VOCs. W szczególności, zaobserwowano 16,8 i 7,25-krotną poprawę skuteczności w redukcji odpowiednio PM10 i PM2.5. Odpowiada to zmniejszeniu stężenia PM10 i PM2,5 odpowiednio o ponad 90% i 80%. Dla domowych środowisk wewnętrznych, w których stężenie lotnych związków organicznych jest rzędu setek ppb do ponad 1 ppm, redukcja przekraczająca 40% została osiągnięta dzięki zastosowaniu urządzenia HYLA jako oczyszczacza powietrza. Ponadto, obserwując trend w stosunku do stężenia LZO celowo dodanych do środowiska, zauważono, że urządzenie pozwala na przywrócenie początkowego stężenia LZO w czasie krótszym niż 2 godziny. Bez oczyszczacza powietrza, stężenie pozostałoby wysokie.

Można zatem stwierdzić, że urządzenie HYLA-EST może być wykorzystane do poprawy jakości powietrza w pomieszczeniach, zarówno w odniesieniu do redukcji cząsteczek unoszących się w powietrzu, jak i lotnych związków organicznych, które mogą być obecne jako zanieczyszczenia emitowane przez różne czynności domowe, takie jak np. sprzątanie, gotowanie posiłków, czystość osobista, stosowanie produktów kosmetycznych itp.

Biorąc pod uwagę potrzebę poprawy jakości powietrza w środowisku wewnętrznym jako środka zmniejszającego ryzyko rozprzestrzeniania się koronawirusa SARS-COV2, te systemy oczyszczania powietrza mogłyby być z powodzeniem stosowane zwłaszcza w zatłoczonych i krytycznych środowiskach (takich jak szkoły lub poczekalnie gabinetów lekarskich i izby przyjęć, a także biura, supermarkety, teatry, kina itp.) Ponadto, w trakcie pracy urządzenia zaobserwowano wyraźne zmniejszenie liczby cząstek, zwłaszcza drobnej frakcji, co pozytywnie wpływa na jakość powietrza w pomieszczeniach ze względu na zdolność do usuwania drobnych cząstek, które mogą wnikać głęboko do płuc.

Wkład autorów:

Konceptualizacja, Paola Fermo i Alessandro Miani; metodologia, Paola Fermo; walidacja, Paola Fermo analiza formalna, Paola Fermo; kurator danych, Paola Fermo, Begoña Artíñano, Alessandro Parente,, Gianluca Di Tanna, Valeria Comite, Gian Luigi De Gennaro; pisanie - przygotowanie pierwotnego projektu, Paola Fermo; napisanie - recenzja i edycja, Paola Fermo, Begoña Artíñano, Gian Luigi De Gennaro, Antonio Marco Pantaleo, Alessandro Parente, Fiorella Battaglia, Elena Colicino, Gianluca Di Tanna, Andouglas Goncalves da Silva Junior, Igor Gadelha Pereira¹, Gabriel Santos Garcia, Luiz Marcos Garcia Goncalves, Valeria Comite; administracja projektu, Paola Fermo i Alessandro Miani; wszyscy autorzy przeczytali i akceptują opublikowaną wersję manuskryptu.

Ujawnienia: Niniejsza praca została wykonana jako dobrowolna, niezależna ocena naukowa skuteczności urzędzeń w ramach działalności instytucjonalnej Włoskiego Towarzystwa Medycyny Środowiskowej (SIMA). Koszty badań przeprowadzonych podczas oceny urzędzeń zostały pokryte przez producenta (Hyla GmbH).

Konflikt interesów: Autorzy nie deklarują konfliktu interesów.

Odnosiniki

1. Pan, L.; Wu, S.; Li, H.; Xu, J.; Dong, W.; Shan, J.; Yang, X.; Chen, Y.; Shima, M.; Deng, F.; et al. (2018) The short-term effects of indoor size-fractionated particulate matter and black carbon on cardiac autonomic function in COPD patients. *Environ.Int.***2018**, *112*, 261–268, doi:10.1016/j.envint.2017.12.037.
2. Azuma, K., Kagi, N., Yanagi, U., & Osawa, H. (2018). Effects of low-level inhalation exposure to carbon dioxide in indoor environments: A short review on human health and psychomotor performance. *Environment international*, *121*, 51-56.
3. Yee, J., Cho, Y.A., Yoo, H.J., Yun, H., Gwak, H.S. (2021) Short-term exposure to air pollution and hospital admission for pneumonia: a systematic review and meta-analysis *Environmental Health: A Global Access Science Source*, *20* (1), art. no. 6.
4. Guercio, V., Pojum, I.C., Leonardi, G.S., Shrubsole, C., Gowers, A.M., Dimitroulopoulou, S., Exley, K.S. Exposure to indoor and outdoor air pollution from solid fuel combustion and respiratory outcomes in children in developed countries: a systematic review and meta-analysis (2021) *Science of the Total Environment*, *755*, art. no. 142187.
5. Kampa, M.; Castanas, E. Human health effects of air pollution. *Env.Pollut.***2008**, *151*, 362–367, doi:10.1016/j.envpol.2007.06.012.
6. Perera, F.; Ashrafi, A.; Kinney, P.; Mills, D. Towards a fuller assessment of benefits to children's health of reducing air pollution and mitigating climate change due to fossil fuel combustion *Environ.Res.***2019**, *172*, 55–72, doi: 10.1016/j.envres.2018.12.016
7. Stabile, L., Buonanno, G., Avino, P., Frattolillo, A., Guerriero, Indoor exposure to particles emitted by biomass-burning heating systems and evaluation of dose and lung cancer risk received by population (2018) *Environmental Pollution*, *235*, pp. 65-73.
8. Buonanno, G., Giovinco, G., Morawska, L., Stabile, L. Lung cancer risk of airborne particles for Italian population(2015) *Environmental Research*, *142*, pp. 443-451.
9. Salthammer, T., Uhde, E., Schripp, T., Schieweck, A., Morawska, L., Mazaheri, M., Clifford, S., He, C., Buonanno, G., Querol, X., Viana, M., Kumar, P. Children's well-being at schools: Impact of climatic conditions and air pollution (2016) *Environment International*, *94*, pp. 196-210.
10. Pacitto, A., Stabile, L., Russo, S., Buonanno, G. Exposure to submicron particles and estimation of the dose received by children in school and non-school environments(2020) *Atmosphere*, *11* (5), art. no. 48
11. F Amato, I Rivas, M Viana, T Moreno, L Bouso, C Reche, M Alvarez-Pedrerol, A Alastuey, J Sunyer, X Querol. Sources of indoor and outdoor PM2.5 concentrations in primary schools. *Science of The Total Environment*, 2014;490:757-765.
12. Reche C, Viana M, Rivas I, Bouso L, Àlvarez-Pedrerol M, Alastuey A, Sunyer J, Querol X. Outdoor and indoor UFP in primary schools across Barcelona. *Sci Total Environ*, 2014;493:943-53.

13. I.Rivas, D.Donaire-Gonzalez, L.Bouso, M.Esnaola, M.Pandolfi, M.de Castro, M.Viana, M. Álvarez-Pedrerol, M. Nieuwenhuijsenb, A. Alastuey, J. Sunyerb, X. Querol.Spatio-temporally resolved black carbon concentration, schoolchildren's exposure and dose in Barcelona. *Indoor Air* 2015. Article first published online: 16 MAY 2015
14. Inquinamento indoor: aspetti generali e casi studio in Italia, ISPRA – Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, ISBN 978-88-448-0451-0, Arianna Lepore, Vanessa Ubaldi e Silvia Brini - Dipartimento Stato dell'Ambiente e Metrologi
15. WHO, 2010. WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants. WHO Regional Office for Europe, Copenhagen, ISBN 978 92 890 0213 4
16. Setti, L., Passarini, F., De Gennaro, G., Barbieri, P., Perrone, M.G., Borelli, M., Palmisani, J., Di Gilio, A., Torboli, V., Fontana, F., Clemente, L., Pallavicini, A., Ruscio, M., Piscitelli, P., Miani, A.SARS-Cov-2RNA found on particulate matter of Bergamo in Northern Italy: First evidence(2020) *Environmental Research*, 188, art. no. 109754
17. Setti, L., Passarini, F., De Gennaro, G., Barbieri, P., Licen, S., Perrone, M.G., Piazzalunga, A., Borelli, M., Palmisani, J., DI Gilio, A., Rizzo, E., Colao, A., Piscitelli, P., Miani, A. Potential role of particulate matter in the spreading of COVID-19 in Northern Italy: First observational study based on initial epidemic diffusion (2020) *BMJ Open*, 10 (9), art. no. e039338
18. Linillos-Pradillo, B., Rancan, L., Ramiro, E.D., Vara, E., Artíñano, B., Arias, J.Determination of SARS-CoV-2 RNA in different particulate matter size fractions of outdoor air samples in Madrid during the lockdown (2021) *Environmental Research*, 195, art. no. 110863
19. Buonanno, G., Stabile, L., Morawska, L. Estimation of airborne viral emission: Quanta emission rate of SARS-CoV-2 for infection risk assessment (2020) *Environment International*, 141, art. no. 105794
20. Luo, J.Y.; Guo, J.J.; Guo, Z.J.; Lan X. Allergy and Immunology Efficacy of air purifier therapy in allergic rhinitis. *AsianPac.J.AllergyImmunol.* 2015, 36, 217–221, doi:10.12932/AP-010717-0109.
21. Zhan, Y.; Johnson, K.; Norris, C.; Shafer, M.M.; Bergin, M.H.; Zhang, Y.; Zhang, J.; Schauer, J.J. The influence of air cleaners on indoor particulate matter components and oxidative potential in residential households in Beijing. *Sci.TotalEnviron.*2018, 626, 507–518, doi:10.1016/j.scitotenv.2018.01.024.
22. Fermo, P., Comite, V., Falciola, L., Guglielmi, V., Miani, A. Efficiency of an air cleaner device in reducing aerosol particulate matter (PM) in indoor environments (2020) *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17 (1), art. no. 18.
23. Park, H., Park, S., Seo, J. Evaluation on air purifier's performance in reducing the concentration of fine particulate matter for occupants according to its operation methods (2020) *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17 (15), art. no. 5561, pp. 1-14
24. Cuccia, E.; Massabò, D.; Ariola, V.; Bove, M.C.; Fermo, P.; Piazzalunga, A.; Prati, P. Size-resolved comprehensive characterization of airborne particulate matter. *Atmos.Environ.* 2013, 67, 14–26, doi:10.1016/j.atmosenv.2012.10.045.
25. Moroni, B., Castellini, S., Crocchianti, S., Piazzalunga, A., Fermo, P., Scardazza, F., Cappelletti, D.Ground-based measurements of long-range transported aerosol at the rural regional background site of Monte Martano (Central Italy) (2015) *Atmospheric Research*, 155, pp. 26-36.
26. Atzei, D., Fantauzzi, M., Rossi, A., Fermo, P., Piazzalunga, A., Valli, G., Vecchi, R. Surface chemical characterization of PM 10 samples by XPS (2014) *Applied Surface Science*, 307, pp. 120-128.
27. Bozzetti, C.; El Haddad, I.; Salameh, D.; Daellenbach, K.R.; Fermo, P.; Gonzalez, R.; Minguillón, M.C.; Iinuma, Y.; Poulain, L.; Elser, M.; et al. Organic aerosol source apportionment by offline-AMS over a full year in Marseille. *Atmos.Chem.Phys.* 2017, 17, 8247–8268, doi:10.5194/acp-17-8247-2017.
28. Cattaneo, A.; Fermo, P.; Urso, P.; Perrone, M.G.; Piazzalunga, A.; Tarlassi, J.; Carrer, P.; Cavallo, D.M. Particulate-bound polycyclic aromatic hydrocarbon sources and determinants in residential homes. *Environ.Pollut.* 2016, 218, 16–25, doi:10.1016/j.envpol.2016.08.033.
29. Daellenbach, K.R.; Stefanelli, G.; Bozzetti, C.; Vlachou, A.; Fermo, P.; Gonzalez, R.; Piazzalunga, A.; Colombi, C.; Canonaco, F.; Hueglin, C.; et al. Long-term chemical analysis and organic aerosol source apportionment at nine sites in central Europe: Source identification and uncertainty assessment. *Atmos.Chem.Phys.*2017, 17, doi:10.5194/acp-17-13265-2017.
30. Bove, M.C., Brotto, P., Calzolari, G., Cassola, F., Cavalli, F., Fermo, P., Hjorth, J., Massabò, D., Nava, S., Piazzalunga, A., Schembari, C., Prati, P. PM10 source apportionment applying PMF and chemical tracer analysis to ship-borne measurements in the Western Mediterranean (2016) *Atmospheric Environment*, 125, pp. 140-151.

31. Schieweck, A., Uhde, E., Salthammer, T., Salthammer, L.C., Morawska, L., Mazaheri, M., Kumar, P. Smart homes and the control of indoor air quality (2018) *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94, pp. 705-718.
 32. Dinoi, A.; Donato, A.; Conte, M.; Contini, D.; Belosi, F. Comparison of atmospheric particle concentration measurements using different optical detectors: Potentiality and limits for air quality applications. *Measurement* 2017, 106, 274-282, doi:10.1016/j.measurement.2016.02.019
 33. Afshari, A.; Matson, U.; Ekberg, L.E. Characterization of indoor sources of fine and ultrafine particles : A study conducted in a full-scale chamber. *IndoorAir* 2005, 15, 141–150. doi:10.1111/j.1600-0668.2005.00332.x.
 34. Kim, J.S., Lee, M.-H. Effect of filter collection efficiency on the clean air delivery rate in an air cleaner (2020) *Indoor Air*, <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-DOI:10.1111/ina.12757>
 35. Zhang, L.; Morisaki, H.; Wei, Y.; Li, Z.; Yang, L.; Zhou, Q.; Zhang, X.; Xing, W.; Hu, M.; Shima, M.; et al. Characteristics of air pollutants inside and outside a primary school classroom in Beijing and respiratory health impact on children. *Environ.Pollut.* 2019, 255, 113147, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113147
 36. Owczarek, T., Rogulski, M., Czechowski, P.O. Assessment of the equivalence of low-cost sensors with the reference method in measuring PM10 concentration using selected correction functions (2020) *Sustainability (Switzerland)*, 12 (13), art. no. 5368.
 37. WHO, 2006. Air Quality Guidelines, Global Update 2005 – Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. World Health Organisation (WHO) Regional Office for Europe, Copenhagen, Denmark.
 38. Jeong, C.H.; Salehi, S.; Wu, J.; North, M.L.; Kim, J.S.; Chow, C.W.; Evans, G.J. Indoor measurements of air pollutants in residential houses in urban and suburban areas: Indoor versus ambient concentrations. *Sci.TotalEnviron.* **2019**, 693, 133446, doi:10.1016/j.scitotenv.2019.07.252.
- 19 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).