

**ALEKSANDRA SIKOROWICZ, MAGDA LEWANDOWSKA,
MAŁGORZATA KUS-LIŚKIEWICZ**

Uniwersytet Rzeszowski, Collegium Medicum, Wydział Biotechnologii, e-mail: mkus@ur.edu.pl
ORCID 0000-0003-2564-6820

PYŁY ZAWIESZONE I ICH ODDZIAŁYWANIE NA ORGANIZMY

Abstrakt: Zanieczyszczenie powietrza stanowi istotne zagrożenie dla zdrowia publicznego oraz równowagi ekosystemów, a jednym z jego najważniejszych składników są pyły zawieszone (PM₁₀, PM_{2,5} i PM₁). Celem pracy jest przegląd aktualnych danych literaturowych dotyczących źródeł, charakterystyki oraz wpływu pyłów zawieszonych na organizm człowieka i środowisko, a także omówienie obowiązujących regulacji prawnych w zakresie jakości powietrza. Analiza badań wykazała, że ekspozycja na PM wiąże się ze zwiększonym ryzykiem chorób układu oddechowego i sercowo-naczyniowego. Pyły zawieszone przyczyniają się również do degradacji gleb, obniżenia produktywności roślin, utraty bioróżnorodności oraz niszczenia infrastruktury. Wnioski wskazują, że skuteczna redukcja negatywnych skutków zanieczyszczeń powietrza wymaga konsekwentnego wdrażania bardziej restrykcyjnych norm jakości powietrza, zgodnych z wytycznymi WHO, oraz realizacji strategii zrównoważonego rozwoju, w tym założeń polityki „zero pollution” do 2050 roku.

Słowa kluczowe: pyły zawieszone, toksyczność, drogi ekspozycji, zrównoważony rozwój

PARTICULATE MATTER AND ITS IMPACT ON HUMAN BODY

Abstract: Air pollution poses a significant threat to public health and ecosystem stability, with particulate matter (PM₁₀, PM_{2,5}, and PM₁) being among its most critical components. The aim of this study is to review current literature data on the sources, characteristics, and impacts of particulate matter on the human body and the environment, as well as to discuss existing regulatory frameworks related to air quality. Analysis of the available studies indicates that exposure to particulate matter is associated with an increased risk of respiratory and cardiovascular diseases. Particulate matter also contributes to soil degradation, reduced plant productivity, biodiversity loss, and damage to infrastructure. The conclusions indicate that effective mitigation of the adverse effects of air pollution requires the consistent implementation of more stringent air quality standards in line with World Health Organization guidelines, as well as the adoption of sustainable development strategies, including the “zero pollution” policy objectives by 2050.

Keywords: particulate matter, toxicity, exposure pathways, sustainable development

I. WSTĘP

Jakość powietrza odgrywa kluczową rolę w kształtowaniu długości życia oraz zdrowia populacji. Wraz z dynamicznym rozwojem cywilizacji obserwuje się pogorszenie stanu czystości powietrza atmosferycznego, szczególnie zauważalne w ostatnich dwóch dekadach co skutkuje wzrastającą ilością zgonów. Przyczynami tego wzrostu są industrializacja, niekontrolowana urbanizacja, wzrost populacji ludzkiej, spalanie paliw kopalnych oraz brak uregulowań dotyczących stosowania chemikaliów w gospodarce [Fuller i in. 2022]. Zanieczyszczenia powietrza można klasyfikować na podstawie ich stanu skupienia, wyróżniając trzy grupy: zanieczyszczenia stałe (obejmujące pyły), zanieczyszczenia ciekłe, do których należą aerozole oraz zanieczyszczenia gazowe, które obejmują różnorodne związki w postaci gazów [Gładysz i in. 2010]. Zanieczyszczenia powietrza definiowane są jako obecność w atmosferze substancji chemicznych, fizycznych lub biologicznych, które w odpowiednim stężeniu mogą negatywnie wpływać na zdrowie człowieka oraz ekosystem. Źródła zanieczyszczeń powietrza dzielą się na naturalne oraz antropogeniczne. Do naturalnych źródeł zanieczyszczeń zaliczamy erupcje wulkanów, erozję gleby, czy też burze piaskowe. Coraz częściej pojawiają się także pożary lasów. Natomiast do antropogenicznych źródeł zliczamy te, które powstały z udziałem człowieka – emisje z silników spalinowych, pyły powstające podczas budowy i rozbiórki budynków oraz spalanie paliw kopalnych. Zanieczyszczenie to jest szczególnie problematyczne w okresach zimowych, kiedy intensywność ogrzewania budynków wzrasta. Sprawny rozwój przemysłu przyczynia się do wzrostu emisji zanieczyszczeń, prowadząc do powstawania smogu w aglomeracjach miejskich [Sala i Zinko 2010].

Zgodnie z definicją podaną przez Światową Organizację Zdrowia (*ang. World Health Organization, WHO*) do czynników mających najbardziej niekorzystny wpływ na zdrowie człowieka, a obecnych w powietrzu należą: pyły zawieszone (PM), tlenek węgla (CO), ozon (O₃), dwutlenek azotu (NO₂) i dwutlenek siarki (SO₂), ołów (Pb), wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (PAH), formaldehyd (FA) [WHO 2021]. WHO podaje też dla wielu związków odpowiednie normy, których przekroczenie i narażenie może skutkować efektami pogorszenia zdrowia. Pomimo identyfikacji związków jako toksyczne, nie dla wszystkich takie poziomy referencyjne zostały ustalone. Należy też pamiętać, że problemy zdrowotne mogą wystąpić zarówno w wyniku krótkotrwałej, jak i długotrwałej ekspozycji na poszczególne czynniki.

Zanieczyszczenia powietrza zatem stanowią jedno z najważniejszych wyzwań środowiskowych i zdrowotnych współczesnego świata. Szacuje się, że zanieczyszczone powietrze jest przyczyną ponad 6.5 miliona zgonów rocznie na całym świecie, i liczba ta wciąż rośnie [WHO TEAM 2021]. Z tego względu ważne są podejmowane kroki w celach przygotowania i rozwijania polityk skupionych na ograniczeniu zanieczyszczenia powietrza. Jak dotąd zrobiono niewiele, aby poradzić sobie z tym ogromnym problemem zdrowia publicznego [Fuller i in. 2022]. Należy też pamiętać, że „triada składowych”: zanieczyszczenie, zmiana klimatu i utrata bioróżnorodności, powiązanych ze sobą, to kluczowe globalne problemy środowiskowe naszych czasów. A zatem rozwiązanie jednego z nich przyniesie korzyści dla pozostałych.

Celem niniejszej pracy jest syntetyczny przegląd aktualnego stanu wiedzy, opartego na dostępnych danych literaturowych, dotyczącego źródeł pochodzenia, charakterystyki fizykochemicznej oraz oddziaływania pyłów zawieszonych na zdrowie człowieka i środowisko, a także analiza obowiązujących regulacji prawnych w zakresie jakości powietrza.

II. METODA PRACY

Dokonano tematycznego przeglądu literatury bazując na dostępnej platformie PubMed i wykorzystując kombinacje słów kluczowych „pyły zawieszone” (*particulate matter*) oraz

„toksyczność” (*toxicity*) - 1341 rekordów; „cytotoksyczność” (*cytotoxicity*) – 126 rekordów; „drogi ekspozycji” (*exposure route*) – 38 rekordów; „wpływ na organizm” (*effect on the body*) – 143 rekordy. Do przeglądu włączono jedynie publikacje naukowe o charakterze badawczym i przeglądowym, opublikowane w latach 2010-2025 oraz wybrane publikacje w języku polskim, które pozwoliły na pełniejsze przedstawienie omawianego zagadnienia w kontekście krajowym. Wybór źródeł bibliograficznych oparto na następujących kryteriach: cytowalność i rozpoznawalność czasopisma; metodologia badań i jakość uzyskanych danych, sposób prezentacji i spójność z istniejącą wiedzą naukową. W dalszej analizie wybrano jedynie te publikacje, które spełniały wszystkie wyżej wymienione kryteria. Przegląd literatury opiera się na źródłach dostępnych w momencie jego ukończenia.

III. WYNIKI

Pyły zawieszone PM₁₀ i PM_{2,5}

Pyły zawieszone (PM, ang. *particulate matters*) są definiowane jako mieszanina cząstek stałych i ciekłych obecnych w powietrzu, które są na tyle małe, że nie osiadają na powierzchni Ziemi pod wpływem grawitacji. Klasyfikacja pyłów zawieszonych opiera się głównie na ich średnicy aerodynamicznej, co warunkuje ich zdolność do penetracji układu oddechowego:

- PM₁₀ ($\leq 10 \mu\text{m}$) – mogą docierać do górnych dróg oddechowych,
- PM_{2,5} ($\leq 2.5 \mu\text{m}$) – wnikają głębiej, aż do oskrzelików i pęcherzyków płucnych,
- PM₁ ($\leq 1 \mu\text{m}$) – ultradrobne cząstki, które mogą przenikać do krwiobiegu i wykazują największy potencjał toksyczny [WHO 2021].

Całkowity pył zawieszony (TSP, ang. *total suspended particulates*) jest to całkowita zawartość pyłu w powietrzu [Hys i in. 2018]. Kluczowe regulacje dotyczące dopuszczalnych dla człowieka norm ekspozycji i sposoby monitorowania ich obecności zawarte są w wytycznych przedstawianych przez WHO i odpowiednich Dyrektywach Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) w sprawie jakości powietrza [Dyrektywa Unii Europejskiej 2008, Dyrektywa Unii Europejskiej 2024]. Mają one na celu promowanie zintegrowania z politykami Unii wysokiego poziomu ochrony środowiska i poprawy jego jakości. W dyrektywach określono limity stężeń, które mają być przestrzegane w państwach członkowskich. Kładzie się również nacisk na stosowanie metod pomiarowych i monitorujących, chcąc przez to uzyskać porównywalne dane na poziomie całej Unii Europejskiej. Dzięki temu możliwe będzie wprowadzenie działań mających na celu redukcję emisji pyłów zawieszonych w katastrofalnych obszarach, aby minimalizować negatywne skutki zdrowotne i środowiskowe. Dyrektywy wskazują na potrzebę wspierania polityki zgodnej z wytycznymi Światowej Organizacji Zdrowia (WHO), które apelują o wprowadzenie bardziej rygorystycznych limitów dla skuteczniejszej ochrony zdrowia. Natomiast nowe inicjatywy promują dążenie do zerowego zanieczyszczenia. Tym samym obejmuje to istotną redukcję pyłów zawieszonych, zerową do roku 2050. W 2021 WHO opublikowała nowe rekomendowane normy dotyczące jakości powietrza, które są bardziej restrykcyjne, co w konsekwencji ma doprowadzić do ograniczenia liczby przedwczesnych zgonów. W wytycznych zmieniono również zakres norm dla pozostałych czynników stanowiących składową zanieczyszczenia powietrza; w tym NO₂, SO₂, CO, O₃ [WHO global air quality guidelines 2021]. Sugeruje się, aby kraje wdrożyły nowe normy do 2030 roku. W Europie przepisy są nieco łagodniejsze niż sugerowane przez WHO (tab. 1).

Wpływ pyłów zawieszonych na organizm

Pyły zawieszone znacząco oddziałują na zdrowie człowieka. Intensywność tego oddziaływania zależy od stężenia pyłów w atmosferze, czasu trwania ekspozycji oraz

liczebności populacji. Skutki zdrowotne wywoływane przez pyły zawieszone można podzielić na te, które związane są z krótkotrwałą ekspozycją oraz te wynikające z długotrwałego narażenia na nadmierne stężenia zanieczyszczeń. Krótkotrwała ekspozycja na wysokie stężenia pyłów zawieszonych, takich jak PM_{2,5} i PM₁₀, może prowadzić do zaostrzenia chorób układu oddechowego, np. astmy. Może także zwiększyć ryzyko infekcji dolnych dróg oddechowych. Długotrwała ekspozycja na pyły zawieszone jest związana z przewlekłymi skutkami zdrowotnymi, takimi jak spadek pojemności płuc [Krzeszowiak i Pawlas 2018].

Tabela 1 – Table 1

Normy jakości powietrza zalecane dla Polski i Europy oraz zalecane przez WHO / *Recommended air quality guideline level for Poland and Europe and those proposed by the World Health Organization (WHO)* [WHO global air quality guidelines 2021].

Rodzaj PM <i>Type of PM</i>	Okres odniesienia / <i>Averaging time</i>	A	B	C
PM₁₀ [µg/m ³]	Stężenie śródroczne / <i>Annual</i>	40	20	15
	Stężenie dobowe / <i>24-hour</i>	50	45	45
PM_{2,5} [µg/m ³]	Stężenie śródroczne / <i>Annual</i>	20	10	5
	Stężenie dobowe / <i>24-hour</i>	25	25	15

A - Normy aktualnie obowiązujące / *Currently guideline value*

B- Normy obowiązujące od 2030 / *Guideline value by 2030*

C- Normy rekomendowane przez WHO / *Guideline reference by WHO*

Cząstki pyłu zawieszonego, w zależności od rozmiaru oddziałują na różne części układu oddechowego. Większe cząstki, te o średnicy 10 µm, dzięki mechanizmom filtracyjnym błon śluzowych są zatrzymywane głównie w górnych drogach oddechowych, takich jak jama nosowa czy gardło. Z perspektywy zdrowotnej znacznie bardziej szkodliwe są bardzo drobne cząstki o średnicy 2,5 µm. Mogą one przenikać do dolnych partii układu oddechowego, docierając do oskrzelików i pęcherzyków płucnych. Bariera pęcherzykowo-włośniczkowa jest bardzo cienka, co umożliwia wymianę gazów, ale również stwarza warunki do przechodzenia cząstek stałych do układu krążenia. Zjawisko to może nasilać się w warunkach przewlekłego narażenia na pyły, które wywołują lokalny stan zapalny i zwiększają przepuszczalność bariery. Po przedostaniu się do krwiobiegu cząstki są transportowane wraz z krwią do różnych narządów i układów [Aguilar-Gomez i in. 2022].

Pył zawieszony, wnikając do dróg oddechowych, oddziałuje na wszystkie ich struktury poprzez różne mechanizmy. Cząstki PM_{2,5} po osadzeniu się w pęcherzykach płucnych mogą wywoływać stan zapalny oraz stres oksydacyjny, co prowadzi do uszkodzenia komórek nabłonka. Zakłóca to wymianę gazową i zmniejsza funkcjonalność płuc. Natomiast PM₁₀ wywołuje podrażnienia błon śluzowych, kaszel, czy zwiększoną produkcję śluzu. Może to zakłócić mechanizmy obronne, takie jak ruch rzęsek, co zwiększa podatność na infekcje bakteryjne i wirusowe [Gładka i Zatoński 2016].

Pyły zawieszone mogą zawierać metale ciężkie lub wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne, które dodatkowo nasilają reakcje zapalne. Nadmierna ekspozycja na cząstki PM_{2,5} doprowadza do rozwoju astmy lub przewlekłej obturacyjnej choroby płuc. Osoby narażone mogą doświadczać trudności w oddychaniu i nasilenie kaszlu. Pyły zawieszone są szczególnie niebezpieczne dla dzieci, których układ oddechowy jest w fazie rozwoju oraz dla osób starszych z obniżoną odpornością [Krzeszowiak i Pawlas 2018].

Pyły zawieszone oddziałują też zewnętrznie, poprzez ich ekspozycję na skórę i narządy zewnętrzne człowieka. Negatywne ich oddziaływanie na funkcjonowanie oczu wynika z ich zdolności do osadzania się na powierzchni oka, oddziałując na rogówkę i spojówkę. Kontakt

z PM_{2,5} może prowadzić do zmniejszenia liczby komórek w nabłonku spojówki, przyczyniając się do destabilizacji filmu łzowego. Skutkuje to dyskomfortem oraz zespołem suchego oka. Jest on także toksyczny dla tkanek śródgałkowych i przyczynia się do rozwoju nadciśnienia ocznego i jaskry. PM₁₀ w warunkach wysokiego zanieczyszczenia i przy długotrwałej ekspozycji również wywołują podrażnienia. Zanieczyszczenia te powodują przewlekłe zapalenie spojówek. Pyły zawieszone stanowią istotny wpływ na zdrowie oczu, szczególnie w obszarach o wysokim stopniu zanieczyszczeń powietrza [Lin i in. 2022].

Ekspozycja na pyły zawieszone może wywoływać zmiany również w składzie mikrobiomu skóry, czego wynikiem jest osłabiona bariera oraz zwiększona podatność na stany zapalne i infekcje. Pyły zawieszone indukują powstawanie reaktywnych form tlenu powodując stres oksydacyjny i uszkodzenie lipidów oraz białek w strukturze skóry. Stres oksydacyjny może zakłócać mechanizmy ochronne skóry – produkcję antybakteryjnych peptydów. Wynikiem tego jest zwiększona przepuszczalność skóry dla szkodliwych substancji, mikroorganizmów patogennych. Drobne cząstki PM_{2,5} mogą przenikać przez barierę skórną i wywoływać reakcje zapalne. Taki system jest związany z przyspieszeniem starzenia się skóry, rozwojem pigmentacji oraz powstawaniem zmarszczek. PM_{2,5} i PM₁₀ mają związek z ryzykiem występowania atopowego zapalenia skóry. Skóra pełni funkcję ochronną przed czynnikami zewnętrznymi, środowiskowymi, a w tym zanieczyszczeniami powietrza. Jednakże długotrwała i powtarzająca się ekspozycja na pyły zawieszone może prowadzić do zaburzeń mikrobiomu skóry [Dijkhoff i in. 2020].

Długotrwała ekspozycja na pyły zawieszone, szczególnie frakcję PM_{2,5} stanowi istotny czynnik ryzyka rozwoju i progresji chorób układu sercowo-naczyniowego. W badaniach oraz metaanalizach wykazano, że nawet niewielki wzrost stężenia PM_{2,5} prowadzi do zauważalnego wzrostu ryzyka wystąpienia poważnych zdarzeń sercowo-naczyniowych, w tym rozwinięcia choroby niedokrwiennej serca (IHD), ostrego zawału mięśnia sercowego (AMI) oraz udaru mózgu — zarówno niedokrwiennego, jak i krwotocznego [Guo i in. 2023]. Badania na ludzkich komórkach endotelialnych (HUVEC i HMEC-1) wykazały, że PM_{2,5} w stężeniach od 200 do 800 µg/ml obniża żywotność komórek, indukując jednocześnie apoptozę w sposób zależny od dawki [Chen i in. 2017]. Analogiczne wyniki uzyskano w eksperymentach na komórkach CHO, gdzie wzrost dawki PM_{2,5} (25–1600 µg/ml) doprowadził do obniżenia żywotności i zwiększenia odsetka komórek apoptotycznych [Peng i in. 2017]. W modelach komórkowych A549 zaobserwowano, że PM_{2,5} gromadzi się w mitochondriach, wywołując ich uszkodzenie prowadzące do nekrotycznego obrazu morfologicznego oraz znaczący wzrost produkcji reaktywnych form tlenu (ROS) i cytokin prozapalnych [Moonwiriya i in. 2024].

Stres oksydacyjny wywoływany przez pyły zawieszone jest uznawany za główny mechanizm prowadzący do uszkodzeń komórkowych w tkankach narażonych na ich działanie. W cząstkach PM, szczególnie frakcji PM_{2,5}, obecne są różnorodne komponenty zdolne do generowania reaktywnych form tlenu. Do takich komponentów należą metale przejściowe, takie jak żelazo (Fe), miedź (Cu) i mangan (Mn), które wchodzą w reakcje redoks, w tym reakcję Fentona. Ta ostatnia umożliwia przekształcenie nadtlenu wodoru (H₂O₂) w silnie reaktywny rodnik hydroksylowy (•OH), co stanowi jedno z najbardziej szkodliwych źródeł ROS w komórkach [Lim i Kim 2024].

Cytotoksyczność pyłów zawieszonych, stanowiących istotny składnik zanieczyszczeń atmosferycznych, stanowi przedmiot rosnącego zainteresowania toksykologii środowiskowej. O sile efektów cytotoksycznych decyduje nie tylko stężenie pyłów, lecz także ich skład chemiczny i źródło pochodzenia. Zróżnicowanie toksyczności cząstek tłumaczy się ich odmiennym składem chemicznym. Pyły występujące podczas inwersji

termicznej zawierały istotnie wyższe stężenia zanieczyszczeń pochodzenia antropogenicznego, w tym metali ciężkich oraz wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (PAH), znanych ze swoich właściwości toksycznych i mutagennych. Natomiast cząstki pochodzące z burz piaskowych charakteryzowały się większą zawartością minerałów naturalnych, takich jak tlenki glinu, żelaza i krzemu [Faraji 2018].

Wpływ pyłów zawieszonych na środowisko

Obecne regulacje prawne i inicjatywy badawcze dotyczące wpływu pyłu zawieszonego są motywowane przede wszystkim ich oddziaływaniem na zdrowie ludzi. Dopiero potem dyskutowane są konsekwencje wpływu na środowisko i ekosystem. Jednak to właśnie skutki środowiskowe, przejawiające się zmniejszeniem bioróżnorodności i utraty wielu dóbr i usług ekosystemowych, mogą okazać się najbardziej szkodliwe dla człowieka w dłuższej perspektywie. Stąd, jednym z priorytetów obecnie prowadzonych polityk na rzecz poprawy jakości powietrza powinna być umiejętnie zaplanowana strategia zrównoważonego rozwoju.

Pyły zawieszone obecne w powietrzu w połączeniu z innymi zanieczyszczeniami przyczyniają się do powstawania smogu, który ogranicza widoczność i negatywnie wpływa na codzienne życie w miastach. Pyły zawierają szkodliwe związki chemiczne, siarczany, azotany i metale ciężkie. Po opadnięciu na powierzchnię gleby i wody zakwaszają środowisko. Proces ten destabilizuje lokalne ekosystemy, zmieniając ich równowagę biologiczną i chemiczną [Łabij-Reduta i in. 2019].

Pyły zawieszone oddziałują na postępujące globalne ocieplenie oraz zanik warstwy ozonowej. Mogą one rozpraszać i odbijać promieniowanie prowadząc tym do ochłodzenia powierzchni Ziemi. Zjawisko to jest szczególnie intensywne w wyniku erupcji wulkanicznych, które zwiększają ilość cząstek. Pyły zawieszone, zwłaszcza PM_{2,5} wpływają na właściwości optyczne atmosfery. Pochłaniają i rozpraszają światło, zmniejszając przy tym widzialność. Widzialność jest istotnym wskaźnikiem jakości powietrza. Jej pogorszenie wiąże się ze wzrostem stężenia pyłów zawieszonych. Pyły zawieszone wchodzą w reakcje chemiczne, które prowadzą do powstawania kwasów siarkowych i azotowych. Są one przyczyną kwaśnych opadów [Singh i in. 2016]. Pyły zawieszone osadzając się na powierzchni roślin, niszczą ich strukturę blokując przy tym ich fotosyntezę i transpirację [Grantz i in. 2003, Sazonova i in. 2024]. Prowadzi to do zmniejszenia wzrostu roślin, a także do spadku produktywności rolniczej. Cząstki te mogą przedostawać się do gleby, a następnie do wód gruntowych. Procesy te z kolei wpływają na zmianę składu chemicznego gleby a tym samym dostępność odpowiednich składników odżywczych dla roślin [Grantz i in. 2003]. Powszechnie obecne w powietrzu pyły zawieszone oddziałują też negatywnie na materiały różnorodnego użytku, w tym na panele słoneczne, budynki i obiekty dziedzictwa kulturowego. Dane literaturowe wskazują, że PM powodują ciemnienie i dekoloryzację obiektów, zmniejszają współczynnik odbicia światła, powodują zwiększone tempo korozji materiałów [Al-Thani i in. 2018, Vidović i in. 2022].

Wytyczne definiujące i identyfikujące obecność pyłów zawieszonych

Od lat 80. XX wieku Unia Europejska (UE) wdraża polityki dotyczące jakości powietrza, które przyczyniają się do znacznego zmniejszenia stężenia większości zanieczyszczeń powietrza w ciągu ostatnich dekad. Jednak problem jakości powietrza jest daleki od rozwiązania. Choć liczba osób narażonych na szkodliwe zanieczyszczenia powietrza znacznie spadła, w przypadku kilku z nich nadal utrzymują się przekroczenia dopuszczalnych norm narażenia. Światowa Organizacja Zdrowia w przewodniku WHO Global Air Quality Guidelines zaleca określone poziomy stężeń sześciu głównych

zanieczyszczeń powietrza, które mają największy wpływ na zdrowie publiczne. Celem wytycznych jest ochrona zdrowia ludzi poprzez wskazanie bezpiecznych poziomów ekspozycji, co ma pomóc rządowi i instytucjom w opracowywaniu polityk ochrony powietrza i zdrowia publicznego [WHO 2021]. Znowelizowana dyrektywa UE w sprawie jakości powietrza atmosferycznego rozwiązuje te problemy, opierając się na poprzednich politykach i ściślej dostosowując unijne normy jakości powietrza do zaleceń naukowych [Dyrektywa Unii Europejskiej 2024]. Dąży się obecnie do maksymalnej eliminacji zanieczyszczeń powietrza, a polityka ta nazywana „zero pollution by 2050” stanowi wytyczną dla wielu krajów na całym świecie. Celem dyrektywy jest:

- określenie wspólnych metod monitorowania, oceny i informowania o jakości powietrza atmosferycznego w UE, w tym w odniesieniu do zanieczyszczeń budzących nowe obawy;
- określenie mechanizmów regularnego monitorowania jakości powietrza;
- kierowanie oceną jakości powietrza na podstawie reprezentatywnej sieci monitorowania, obejmującej ponad 4000 stacji w całej UE oraz zwiększone wykorzystanie modelowania jakości powietrza;
- wymiana rzetelnych, obiektywnych i porównywalnych informacji na temat jakości powietrza, obejmująca również informowanie ogółu społeczeństwa o możliwych skutkach zdrowotnych;
- opracowanie planów ochrony powietrza, które skutecznie zapobiegają przekraczaniu norm UE i zapobiegają tym problemom.

Narzędziem do oceny stanu jakości powietrza jest stosowany obecnie w wielu krajach Indeks Jakości Powietrza, tzw. AQI, (Air Quality Index). Jest to narzędzie Agencji Ochrony Środowiska (EPA) służące do informowania o jakości powietrza zewnętrznego i zdrowiu. AQI obliczany jest na podstawie stężeń pięciu głównych czynników szkodliwych obecnych w powietrzu, im wyższa wartość AQI, tym wyższy jest poziom zanieczyszczenia i tym bardziej jest ono szkodliwe dla zdrowia. Wskaźnik jakości powietrza (AQI) jest podzielony na sześć kategorii (tab. 2). Każda kategoria odpowiada innemu poziomowi zagrożenia zdrowotnego. Każda kategoria ma również określony kolor. Kolor ten ułatwia mieszkańcom szybkie określenie czy jakość powietrza w ich społecznościach osiąga poziom szkodliwy dla zdrowia.

Obecnie, wskaźniki jakości powietrza na całym świecie są dostępne dla każdego w czasie rzeczywistym [Horn i Dasgupta 2024, IQAir].

IV. PODSUMOWANIE

Rozległe dowody potwierdzające wpływ oraz negatywne skutki ekspozycji człowieka i środowiska na pyły zawieszone obecne w powietrzu podkreślają konieczność wdrożenia działań ograniczających narażenie populacji. Główne wyzwania powinny koncentrować się na ustalaniu priorytetów w edukacji, odpowiadając na pytania: jak, dlaczego i na kogo oddziałuje zanieczyszczenie powietrza. Pomimo licznych wyników badań, nadal istnieją istotne luki w wiedzy dotyczące interakcji między zanieczyszczeniami powietrza a reakcjami komórkowymi i organizmowymi. W związku z tym niezbędne jest stałe finansowanie tego typu projektów badawczych.

Należy dążyć do opracowania metod umożliwiających ocenę skuteczności wprowadzanych interwencji, co pozwoli na bezpośrednie powiązanie poprawy jakości powietrza ze stanem zdrowia oraz uwzględnienie korzyści i strat klimatycznych. Skuteczne działania wymagają koordynacji na poziomie międzynarodowym i mogą przyczynić się do realizacji Celów Zrównoważonego Rozwoju (*ang. Sustainable Development Goals, SDG*), ze szczególnym uwzględnieniem krajów o niskim i średnim dochodzie.

Tabela 2 – Table 2

Kategorie Indeksu Jakości Powietrza oraz odpowiadające im zakresy stężeń pyłów zawieszonych; opracowanie na podstawie www.powietrze.gios.gov.pl / Categories of the Air Quality Index and the corresponding ranges of particulate matter concentrations, based on www.powietrze.gios.gov.pl

Kategoria AQI AQI Category	Informacje zdrowotne / Health impact	PM10 [µg/m³]	PM2,5 [µg/m³]
Bardzo dobry Good	Jakość powietrza jest bardzo dobra, zanieczyszczenie powietrza nie stanowi zagrożenia dla zdrowia, warunki bardzo sprzyjające do wszelkich aktywności na wolnym powietrzu, bez ograniczeń / Air quality is very good; air pollution does not pose a health risk, and conditions are highly favorable for all outdoor activities, with no restrictions	0-20	0 - 13
Dobry Satisfactory	Jakość powietrza jest zadowalająca, zanieczyszczenie powietrza powoduje brak lub niskie ryzyko zagrożenia dla zdrowia. Można przebywać na wolnym powietrzu i wykonywać dowolną aktywność, bez ograniczeń / Air quality is satisfactory; air pollution poses little or no health risk. Outdoor activities can be performed without any restrictions	20,1 - 50	13,1 - 35
Umiarkowany Moderate	Jakość powietrza jest akceptowalna. Zanieczyszczenie powietrza może stanowić zagrożenie dla zdrowia w szczególnych przypadkach (dla osób chorych, osób starszych, kobiet w ciąży oraz małych dzieci). Warunki umiarkowane do aktywności na wolnym powietrzu / Air quality is acceptable. Air pollution may pose a health risk in certain cases (for people with illnesses, the elderly, pregnant women, and young children). Conditions are moderate for outdoor activities	50,1 – 80	35,1 – 55
Dostateczny Poor	Jakość powietrza jest dostateczna, zanieczyszczenie powietrza stanowi zagrożenie dla zdrowia (szczególnie dla osób chorych, starszych, kobiet w ciąży oraz małych dzieci) oraz może mieć negatywne skutki zdrowotne. Należy rozważyć ograniczenie (skrócenie lub rozłożenie w czasie) aktywności na wolnym powietrzu, szczególnie jeśli ta aktywność wymaga długotrwałego lub wzmoczonego wysiłku fizycznego / Air quality is moderate; air pollution poses a health risk (especially for people with illnesses, the elderly, pregnant women, and young children) and may have negative health effects. Limiting outdoor activities should be considered (shortening them or spreading them over time), particularly if the activity involves prolonged or intense physical exertion	80,1 – 110	55,1 – 75
Zły Very poor	Jakość powietrza jest zła, osoby chore, starsze, kobiety w ciąży oraz małe dzieci powinny unikać przebywania na wolnym powietrzu. Pozostała populacja powinna ograniczyć do minimum wszelką aktywność fizyczną na wolnym powietrzu - szczególnie wymagającą długotrwałego lub wzmoczonego wysiłku fizycznego / Air quality is poor, people who are ill, the elderly, pregnant women, and young children should avoid staying outdoors. The rest of the population should reduce all outdoor physical activity to a minimum, especially activities that require prolonged or intense physical exertion	110,1 - 150	75,1 – 110
Bardzo zły Severe	Jakość powietrza jest bardzo zła i ma negatywny wpływ na zdrowie. Osoby chore, starsze, kobiety w ciąży oraz małe dzieci powinny bezwzględnie unikać przebywania na wolnym powietrzu. Pozostała populacja powinna ograniczyć przebywanie na wolnym powietrzu do niezbędnego minimum. Wszelkie aktywności fizyczne na zewnątrz są odradzane. Długotrwała ekspozycja na działanie substancji znajdujących się w powietrzu zwiększa ryzyko wystąpienia zmian m.in. w układzie oddechowym, naczyniowo-sercowym oraz odpornościowym / Air quality is very poor and has a negative impact on health. People who are ill, the elderly, pregnant women, and young children should strictly avoid staying outdoors. The rest of the population should limit time spent outdoors to the absolute minimum. All outdoor physical activities are discouraged. Prolonged exposure to substances present in the air increases the risk of adverse changes, including in the respiratory, cardiovascular, and immune systems.	> 150	> 110

BIBLIOGRAFIA

1. Aguilar-Gomez S., Dwyer H., Zivin J.G., Neidell M. 2022. This Is Air: The “Nonhealth” Effects of Air Pollution. *Annual Review Resource Economics*. 14. 403-425. <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-111820-021816>.
2. Al-Thani H., Koç M., Isaifan R.J. 2018. A review on the direct effect of particulate atmospheric pollution on materials and its mitigation for sustainable cities and societies. *Environmental Science and Pollution Research*. 25. 27839-27857. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2952-8>.
3. Chen S., Wu X., Hu J., Dai G., Rong A., Guo G. 2017. PM2.5 exposure decreases viability, migration and angiogenesis in human umbilical vein endothelial cells and human microvascular endothelial cells. *Mol Med Rep*. 16(3). 2425-2430. doi: 10.3892/mmr.2017.6877.
4. Dijkhoff I.M., Drasler B., Karakocak B.B., Petri-Fink A., Valacchi G., Eeman M., Rothen-Rutishauser B. 2020. Impact of Airborne Particulate Matter on Skin: A Systematic Review from Epidemiology to in Vitro Studies. *Particle and Fibre Toxicology*. 17 (1). 35. <https://doi.org/10.1186/s12989-020-00366-y>.
5. Dyrektywa Unii Europejskiej. 2008. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/50/WE z dnia 21 maja 2008 r. w sprawie jakości powietrza i czystszej powietrza dla Europy. [<http://data.europa.eu/eli/dir/2008/50/oj>].
6. Dyrektywa Unii Europejskiej. 2024. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2024/2881 z dnia 23 października 2024 r. w sprawie jakości powietrza i czystszej powietrza dla Europy [dok. elektr. <http://data.europa.eu/eli/dir/2024/2881/oj>. data wejścia 28.12.2025].
7. Faraji M., Nabizadeh Nodehi R., Naddafi K., Pourpak Z., Alizadeh Z., Rezaei S., Mesdaghinia A. 2018. Cytotoxicity of airborne particulate matter (PM10) from dust storm and inversion conditions assessed by MTT assay. *Journal of Air Pollution and Health*. 3(3). 135-142.
8. Fuller R., Landrigan P.J., Balakrishnan K., Glynda B., Bose-O'Reilly S. i in. 2022. Pollution and Health: A Progress Update. *The Lancet Planetary Health* 6 (6): e535-47. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(22\)00090-0](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(22)00090-0).
9. Gładka A., Zatoński T. 2016. Wpływ zanieczyszczeń powietrza na choroby układu oddechowego. *Kosmos Problemy Nauk Biologicznych*. 65(4). 573-82.
10. Gładysz J., Grzesiak A., Nieradko-Iwanicka B., Borzęcki A. 2010. Wpływ zanieczyszczenia powietrza na stan zdrowia i spodziewaną długość życia ludzi, IV Międzynarodowe Sympozjum Naukowe "Środowiskowe źródła zagrożeń zdrowotnych". Krasieczyn. 17-19.09. 2009.
11. Grantz D.A., Garner J.H., Johnson D.W. 2003. Ecological effects of particulate matter. *Environ Int*. 29(2-3). 213-39. doi: 10.1016/S0160-4120(02)00181-2.
12. Guo J., Chai G., Song X., Hui X., Li Z., Feng X., Yang K. 2023. Long-term exposure to particulate matter on cardiovascular and respiratory diseases in low- and middle-income countries: A systematic review and meta-analysis. *Front Public Health*. 11.1134341. doi: 10.3389/fpubh.2023.1134341.
13. Horn S.A., Dasgupta P.K. 2024. The Air Quality Index (AQI) in historical and analytical perspective a tutorial review. *Talanta*. 267. 125260. doi: 10.1016/j.talanta.2023.125260.
14. Hys A., Dumańska J., Tworek K. 2018. Stężenie pyłów zawieszonych PM10 w Polsce w 2015 roku – porównanie danych z serwisu CAMS programu Copernicus z danymi

- Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska. Technika i pomiary. Metrologia i probiernictwo – Biuletyn Głównego Urzędu Miar. 1(20).
15. IQAir. [dok. elektr. <https://www.iqair.com/world-air-quality>. data wejścia 28.12.2025].
 16. Krzeszowiak J., Pawlas K. 2018. Pył zawieszony (PM_{2,5} oraz PM₁₀), właściwości oraz znaczenie epidemiologiczne ekspozycji krótko i długookresowej dla chorób układu oddechowego oraz krążenia. *Medycyna Środowiskowa - Environmental Medicine*. 2 (czerwiec). 7-13. <https://doi.org/10.19243/2018201>.
 17. Łabij-Reduta B., Borawski J., Naumnik B. 2019. Uwaga! SMOG! *Varia Medica*. 3(1). 68-76.
 18. Lim, E.Y.; Kim, G.-D. 2024. Particulate Matter-Induced Emerging Health Effects Associated with Oxidative Stress and Inflammation. *Antioxidants*. 1256. <https://doi.org/10.3390/antiox13101256>.
 19. Lin C.C., Chiu C.C., Lee P.Y., Chen K.J., He C.X., Hsu S.K., Cheng K.C. 2022. The Adverse Effects of Air Pollution on the Eye: A Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 19(3). 1186. <https://doi.org/10.3390/ijerph19031186>.
 20. Moonwiriya A., Dinsuwannakol S., Sontikun J., Timpratueang K., Muanprasat C., Khemawoot P. 2024. Fine particulate matter PM_{2.5} and its constituent, hexavalent chromium induces acute cytotoxicity in human airway epithelial cells via inflammasome-mediated pyroptosis. *Environmental Toxicology and Pharmacology*. 107. 104416. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2024.104416>.
 21. Peng H., Zhao X.H., Bi T.T., Yuan X.Y., Guo J.B., Peng S.Q. 2017. PM_{2.5} obtained from urban areas in Beijing induces apoptosis by activating nuclear factor-kappa B. *Mil Med Res*. 4(1).27. doi: 10.1186/s40779-017-0136-3.
 22. Sala S., Zinko I. 2010. Wybrane problemy zanieczyszczeń powietrza. *Rocznik Świętokrzyski. Seria B – Nauki Przyrodnicze* nr 31. Kielce 2010.
 23. Sazonova O.I., Ivanova A.A., Vetrova A.A., Zvonarev A.N., Streletskii R.A., Vasenev V.I., Myazin V.A., Makhinya K.I., Kozlova E.V. Korneykova M.V. 2024. Impact of Anthropogenic Factors on the Diversity of Microbial Communities of PM₁₀ Air and PM₁₀₀ of Tilia L. Phylloplane in an Urban Ecosystem. *Biology* 2024. 13. 969. <https://doi.org/10.3390/biology13120969>.
 24. Singh S., Elumalai S.P., Pal A.K. 2016. Rain pH estimation based on the particulate matter pollutants and wet deposition study. *Sci Total Environ*. 563-564. 293-301. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.04.066.
 25. Vidović K., Hočevar S., Menart E., Drvenčić I., Grgić I., Kroflič A. 2022. Impact of air pollution on outdoor cultural heritage objects and decoding the role of particulate matter: a critical review. *Environmental Science and Pollution Research International*. 2022 Jul;29(31). 46405-46437. doi: 10.1007/s11356-022-20309-8.
 26. WHO 2021. Air quality, energy and health (AQE). [dok. elektr. <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/air-quality-and-health/health-impacts/types-of-pollutants>. data wejścia 28.12.2025].
 27. WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. 2021. Geneva: World Health Organization.
 28. WHO TEAM. 2021. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. WHO TEAM. 2021. [dok. elektr. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>. data wejścia 28.12.2025].