

Pył jako element jakości powietrza wewnętrznego – przegląd badań

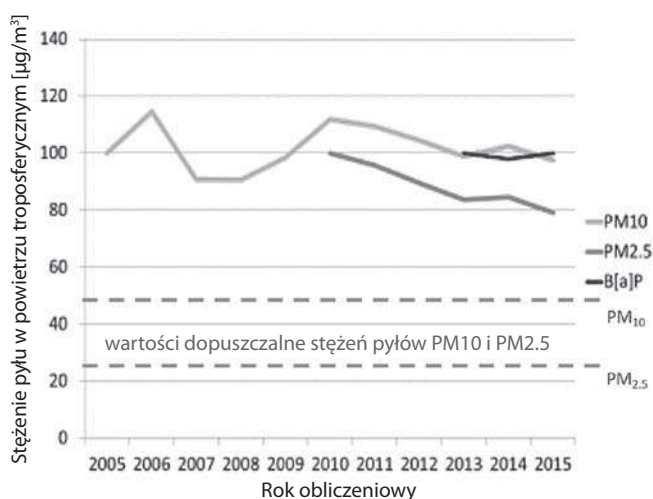
Mgr inż. Dominik Bekierski, Zakład Fizyki Ciepłej, Akustyki i Środowiska, Instytut Techniki Budowlanej

1. Wprowadzenie

Zanieczyszczenie powietrza to globalne zagrożenie mające wpływ na środowisko i zdrowie człowieka. Zagadnienie to zaczyna stanowić coraz większy problem w aglomeracjach miejskich, gdzie występuje kumulacja z różnych źródeł emisji naturalnych, antropogenicznych – punktowych (komin, wulkany), liniowych (szlaki komunikacyjne), płaszczynowych (np. składowiska odpadów, pożary lasów itp.) [1]. Analiza Światowej Organizacji Zdrowia (WHO – World Health Organisation) [2] wskazuje na fakt, że 90% mieszkańców na kuli ziemskiej zamieszkuje tereny, gdzie zanieczyszczenie powietrza przekracza poziomy dopuszczalne wyznaczone przez (WHO) [3]. W Polsce, na podstawie pomiarów średniorocznych, można zaobserwować, że akceptowalne progi są znacznie przekroczone (rys. 1). W 2008 roku Komisja Europejska bazując na wytycznych WHO, przyjęła dyrektywę w sprawie jakości powietrza i czystszej powietrza dla Europy [4]. Polskie przepisy, przyspieszające proces eliminowania zagrożeń związanych z zanieczyszczeniem powietrza, zostały wprowadzone w czerwcu 2019 roku, poprzez nowelizację ustawy Prawo ochrony środowiska [5]. Rozwiązywane problemy monitoringu jakości powietrza w zakresie zanieczyszczenia pyłem PM10 oraz PM2.5 skupiają się na środowisku zewnętrznym (z wyjątkiem środowiska pracy) – brak jest kryteriów oraz metod do pomiaru stężenia pyłów np. w budynkach mieszkalnych, zamieszkania zbiorowego i użyteczności publicznej.

2. Pyły jako składnik zanieczyszczenia powietrza

Zanieczyszczenie powietrza w miastach stanowi poważny problem na całym świecie zarówno w krajach rozwiniętych, jak i rozwijających się. Wzrost populacji ludności miejskiej i natężenia ruchu zmotoryzowanego w miastach spowodowały poważne zanieczyszczenie powietrza wpływające na otaczające środowisko i zdrowie ludzi. Składnikami zanieczyszczenia odpowiedzialnymi za pogorszenie jakości powietrza w mieście są tlenki azotu (NO_x), dwutlenek siarki (SO_2), tlenek węgla (CO), cząstki stałe (PM) i lotne związki organiczne (VOC) [7]. Cząstki stałe w otoczeniu (PM – *Particulate Matter*) to złożona mieszanina cząstek stałych i ciekłych zawieszonych w powietrzu. Rozmiar, skład chemiczny i inne właściwości fizyczne



Rys. 1. Zmiany poziomu średniorocznego zanieczyszczenia pyłami PM10, PM2.5 w $\mu\text{g}/\text{m}^3$ oraz benzo(a)pirenu w latach 2005–2015 w Polsce oraz wartości dopuszczalne stężeń tych pyłów (od 2015 r.) według dyrektywy 2008/50/WE; źródło: opracowanie własne na podstawie [6]

i biologiczne cząstek różnią się w zależności od lokalizacji, czasu i źródeł zanieczyszczeń. Obecnie powszechnie stosowany jest następujący podział pyłów ze względu na rozmiar cząstek:

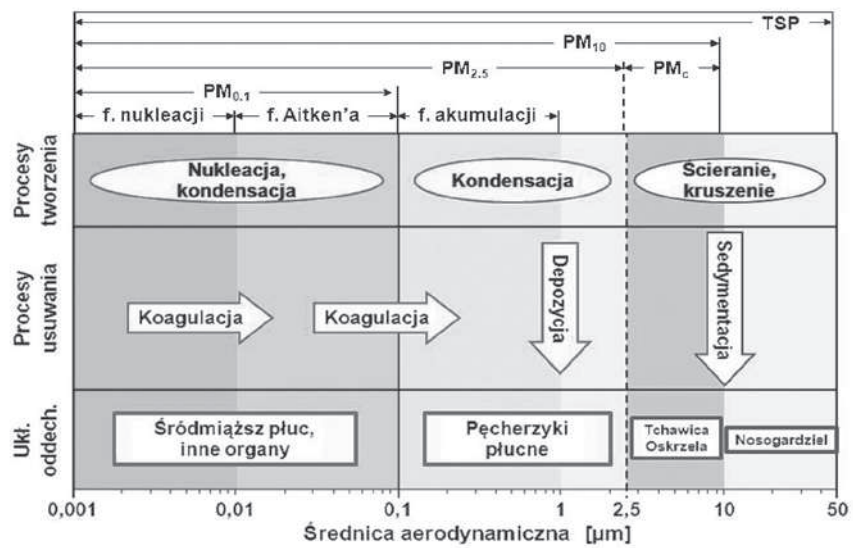
- całkowity pył zawieszony (TSP, ang. *Total Suspended Particles*) – całkowity pył zawieszony w powietrzu;
- pył PM10 – frakcja pyłu zawieszzonego o średnicach zastępczych cząstek poniżej $10 \mu\text{m}$;
- pył PM2.5-10 – w literaturze spotykane jest także oznaczenie PMc (ang. *coarse*) – frakcja pyłu zawieszzonego o średnicach zastępczych cząstek pomiędzy $2,5 \mu\text{m}$ i $10 \mu\text{m}$;
- pył drobny PM2.5 – frakcja pyłu zawieszzonego o średnicach zastępczych cząstek poniżej $2,5 \mu\text{m}$;
- pył submikronowy PM1 – frakcja pyłu zawieszzonego o średnicach zastępczych cząstek poniżej $1,0 \mu\text{m}$;
- pył ultradroby (UFP, ang. *Ultrafine Particle*) PM0.1 – frakcja pyłu zawieszzonego o średnicach zastępczych cząstek poniżej $0,1 \mu\text{m}$.

Inspekcja Ochrony Środowiska bada zawartość pyłu zawieszzonego PM10 i PM2.5 w powietrzu stosując dwie metody:

- grawimetryczną (referencyjną), która jest uznana i stosowana na świecie jako najbardziej precyzyjna metoda pomiaru;

Rys. 2. Rozkład wielkości cząstek pyłu zawieszonego w zależności od miejsca ich wchłaniania w układzie oddechowym; źródło: [1] na podstawie [19, 20, 21]

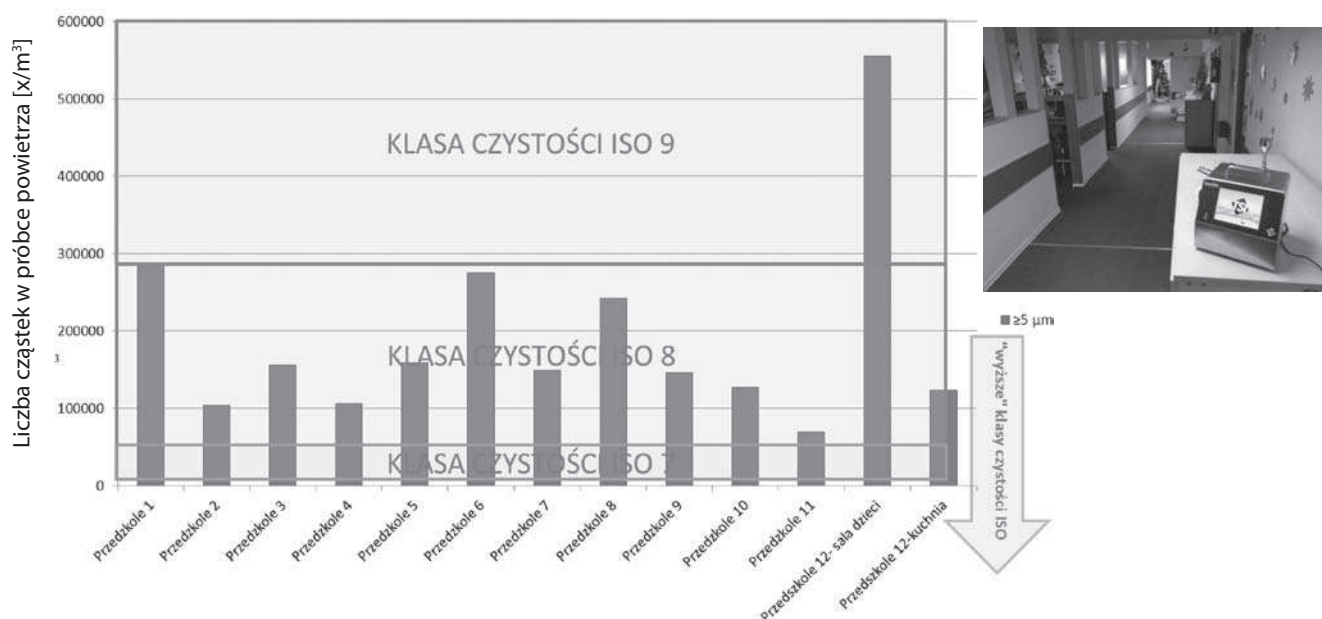
• optyczną, z wyznaczoną równoważnością metrologiczną do metody referencyjnej. Źródła mogą być naturalne, takie jak pożary lasów lub wynikać z działalności człowieka, jak prowadzenie pojazdów i działalność zakładów produkcyjnych lub elektrowni. Ponadto reaktywne związki w atmosferze łączą się, tworząc cząsteczki wtórne, takie jak siarczany, które mogą stanowić znaczną część całkowitej ilości PM. Na poziomy PM w powietrzu w dowolnym konkretnym miejscu wpływają również lokalne mieszanki zanieczyszczeń gazowych, meteorologia, geografia i wzorce sezonowe [8]. Badania amerykańskiej agencji ochrony środowiska (EPA – Environmental Protection Agency) [9] wskazują, że zarówno krótka, jak i długotrwała ekspozycja na podwyższone stężenie pyłów o średnicy mniejszej niż 2.5 μm (PM_{2.5}), docierających do pęcherzyków płucnych i śródmiąższu (rys. 2), powoduje wzrost zachorowalności na choroby serca i śmiertelność. EPA wykazała również ściśle powiązanie pyłów z negatywnym wpływem na zdrowie, m.in. powodowanie osłabienia czynności płuc, nowotworów płuc, gardła i krtani, zaburzeń rytmu serca, zapalenia naczyń krwionośnych, miażdżycy, nasilenie objawów chorób związanych z układem krwionośnym i oddechowym. Korelacja między zanieczyszczeniem powietrza na zewnątrz a problemami zdrowotnymi, dotyczącymi w szczególności układu oddechowego i sercowo-naczyniowego, została szeroko wykazana [10, 11, 12, 13]. Badania innych autorów wskazują, że korelacja między osobistym narażeniem a stężeniami pyłu zawieszonego na zewnątrz jest wciąż nierozpoznana [14, 15, 16]. Większość cząstek pochodzenia zewnętrznego (zanieczyszczenie otoczenia) występuje w naszych domach, w których jesteśmy również narażeni na cząsteczki pochodzenia wewnętrznego. Wspomniane cząsteczki przenikają do wnętrza drogą infiltracji, pochodzą z dymu papierosowego, gotowania na kuchenkach gazowych, a także z wyrobów budowlanych [17]. Narażenie na pyły PM_{2.5} ze źródeł wewnętrznych można zredukować, ograniczając czynności związane z wytwarzaniem cząstek, zapewniając odpowiednią wentylację i cyrkulację powietrza wewnętrznego przez filtry. Dotychczas nie opracowano dokładnych i wiarygodnych metod wyznaczania stężenia pyłów w budynkach. Wprowadzenie prawidłowo opracowanych metrologicznie metod próbkowania i pomiaru stężenia pyłów we wnętrzach budynków pozwoli na opracowanie metod oceny środowiska



wewnętrznych budynków oraz wpłynie na uściślenie charakterystyki energetycznej budynków w odniesieniu do jakości powietrza wewnętrznego zgodnie normą [18], która zastąpiła PN-EN 15251:12.

2.1. Monitoring jakości powietrza wewnętrznego – studium przypadku

Zależność pomiędzy zanieczyszczeniem powietrza środowiska zewnętrznego a jakością powietrza wewnątrz pomieszczeń jest obecnie przedmiotem badań na całym świecie. Różnią się między sobą metodyką badań oraz wykorzystywaną aparaturą, jednak zmierzają w tym samym celu – do oceny jakości powietrza zewnętrznego i wewnętrznego. Aktualne badania w Polsce skupiają się na możliwości zwiększenia siatki monitoringu jakości powietrza zewnętrznego nadzorowanego przez Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, poprzez wspomaganie indywidualnymi (budżetowymi) miernikami do zastosowań przydomowych [22, 23]. Na terenie miasta Rabki-Zdrój oraz Dobczyce wykonywane były badania porównawcze stężeń pyłu zawieszonego PM₁₀ i PM_{2.5} w powietrzu atmosferycznym przy użyciu urządzeń działających w oparciu o metrologicznie niespójne metodyki bez wykazanej równoważności do metodyki referencyjnej. Badania wykonywano wg metodyki i procedur zawartych w normach PN-EN 16450:2017-05 [24] oraz PN-EN 12341:2014-07 [25]. Procedury opisują zasady wykonywania testów bazujące na ocenie charakterystyki pracy dwóch urządzeń niereferencyjnych w odniesieniu do pomiarów referencyjnych, wykonywanych przy użyciu dwóch urządzeń referencyjnych. Celem badań było określenie przydatności nisko kosztowych urządzeń do prowadzenia pomiarów stężeń pyłów w ocenie jakości powietrza w zmiennych warunkach meteorologicznych. Wnioski otrzymane na podstawie badań wskazują na brak zgodności wyników pomiędzy parą takich samych urządzeń pomiarowych, co prowadzi do wniosku, iż nawet stosując urządzenia pomiarowe (czujniki) jednakowego typu, otrzymane wartości stężeń pyłu



Rys. 3. Stężenie cząstek $\geq 5 \mu\text{m}$ w pomieszczeniach badanych przedszkoli oraz połowy miernik cząstek AeroTrak 9310; źródło: wyniki badań własnych [17]

zawieszonego mogą się od siebie znacząco różnić. Wątpliwość budzi też wymagana niepewność pomiarowa dla pomiarów ciągłych niskobudżetowych czujników oraz wrażliwość urządzeń na zmienne warunki meteorologiczne. Do podobnych wniosków doszli autorzy raportu [26] opracowanego na zlecenie Komisji Europejskiej w stosunku do niskobudżetowych urządzeń pomiarowych. „Pomiary za pomocą niedrogich czujników mają często niższą i bardziej wątpliwą jakość danych niż wyniki z oficjalnych stacji monitorowania przeprowadzanych przez państwa członkowskie UE zgodnie z prawodawstwem europejskim i metodami standardów międzynarodowych. Jeśli poprawi się jakość pomiarów, to czujniki będą mogły stać się przełomem w monitorowaniu zanieczyszczenia powietrza, zarządzaniu ruchem, narażeniu osobistym i ocenie zdrowia, badaniach obywatelskich i ocenie zanieczyszczenia powietrza w krajach rozwijających się”. Autorzy innego badania przeprowadzonego w Polsce [27] z zastosowaniem średniobudżetowych mierników jakości powietrza, w lokalizacjach oddalonych od państwowych stacji pomiarowych, wskazują, że zastosowanie czujników o średniej cenie wydaje się być dobrą alternatywą zarówno dla profesjonalnych stacji pomiarowych, jak i tanich urządzeń. Wyniki pomiarów odnoszone były do europejskiego indeksu jakości powietrza (CAQI, ang. *Common Air Quality Index*) opracowanego w oparciu o zebrane doświadczenia projektu CITEAIR [28].

Badania przeprowadzone przez Liu i in. [29] wykazują, że niskobudżetowe mierniki jakości powietrza mogą być zastosowane do oceny jakości powietrza, jednak niezbędna jest kalibracja z zastosowaniem próbek wzorcowych powietrza o stałym stężeniu cząstek pyłu. Autorzy analiz zanieczyszczenia powietrza w Azji w latach 1998–2015 wykazują ścisłą korelację zanieczyszczenia powietrza zewnętrznego

i wewnętrznego w zależności od typu budynku [30, 31]. Inne badania łączą zanieczyszczenia pyłem $\text{PM}_{2.5}$ z natężeniem ruchu turystycznego i innymi czynnikami społeczno-ekonomicznymi w Chinach [32] i powiązanie go ze światowym wskaźnikiem AQI (*Air Quality Index*) [33, 34].

W Europie również prowadzone są badania zanieczyszczenia pyłem wewnątrz budynków. Przeprowadzone badania pomieszczeń biurowych w ramach projektu OFFICEAIR wykazały, że stężenie frakcji $\text{PM}_{2.5}$ przekroczyło średnią roczną wartość orientacyjną WHO (10 mg/m^3) w 50% pobranych próbek [35]. We wnioskach stwierdzono, że wartość docelową (25 mg/m^3) dla średniego rocznego stężenia $\text{PM}_{2.5}$ w otoczeniu ustalonego przez Komisję Europejską [4] powinno się ponownie rozważyć. W badaniu zaobserwowano również, że pył $\text{PM}_{2.5}$ w pomieszczeniach pochodził z zewnątrz, stężenie nie wynikało z emisji wewnętrznej. W latach 2004–2006, w Monachium oraz w monachijskiej strefie podmiejskiej, zostały przebadane 64 szkoły w zakresie zanieczyszczenia pyłem PM_{10} i $\text{PM}_{2.5}$ zarówno w sezonie zimowym, jak i letnim przy zastosowaniu pomiaru grawimetrycznego i laserowego [36]. W analizie wykazano, że w klasach występuje ryzyko narażenia na wysokie stężenie PM, a także zidentyfikowano parametry skorelowane z zanieczyszczeniem pyłem, jak stężenie CO_2 , ilość cząstek stałych (PNC, ang. *Particle Number Concentration*), zlokalizowanie klasy względem wysokości budynku oraz wyposażenie klasy (np. dywany). Zaobserwowano podwyższoną koncentrację PM w sezonie zimowym, jednak tylko w małych pomieszczeniach i przy zwiększonej liczbie użytkowników. Do zbliżonych wniosków doszli autorzy badań stężenia cząstek w przedszkolach na terenie Warszawy wykonanych w grudniu 2016 [17]. Do oceny stężenia (ilości cząstek w m^3 powietrza) pyłów w powietrzu przedszkoli użyto połowego miernika cząstek AeroTrak 9310.

Wyniki odnoszono do klas czystości pomieszczeń wg PN-EN ISO 14644-1 [37], które przypisuje się do pomieszczenia przy uwzględnieniu czynników wpływających na emisję cząstek czyli: aktywności użytkowników, rodzaju wyposażenia lub wyrobów budowlanych (rys. 3) po uwzględnieniu stężenia cząstek w powietrzu zewnętrznym.

3. Podsumowanie

Przegląd zebranych doświadczeń pokazuje, że jakość powietrza zewnętrznego, a tym samym wewnętrznego w środowisku miejskim stanowi duże wyzwanie. Jest to analiza wielokryterialna uwzględniająca szereg aspektów geograficznych, fizycznych i chemicznych, a nawet społecznych. Aktualne badania są skoncentrowane na doborze metod pomiarowych oraz różnego rodzaju monitorów środowiska w celu rzetelnej oceny jakości powietrza. Próba skorelowania wyników pomiarów jakości powietrza zewnętrznego z wynikami pomiarów jakości powietrza wewnętrznego i powiązanie ich z popularnymi wskaźnikami (np. AQI), w znaczący sposób przyczyni się do podniesienia wiedzy bazowej projektowania budynków i systemów wentylacyjnych, a także pośrednio wpłynie na higienę i zdrowie człowieka.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Juda-Rezler K. i in., Pyły drobne w atmosferze. Kompedium wiedzy o zanieczyszczeniu powietrza pyłem zawieszonym w Polsce, Bibl. Monit. Środowiska, Główny Inspektorat Ochr. Środowiska, Warszawa, 2016
- [2] Schneider J., Nagl C., Read B., EU Air Quality Policy and WHO Guidelines, Policy Dep. A Econ. Sci. Policy, nr IP/A/ENVI/2014-06 PE 536.285, 2014
- [3] Caplan A. J., Acharya R., Optimal vehicle use in the presence of episodic mobile-source air pollution, *Resour. Energy Econ.*, tom 57, sierpień 2019, str. 185–204
- [4] Rada Unii Europejskiej i Parmalemt Europejski, Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady Europy 2008/50/WE z dnia 21 maja 2008 r. w sprawie jakości powietrza i czystszej powietrza dla Europy, *Dz. Urzędowy UE*, tom L 152, 2008, str. 1–44
- [5] Dz.U. 2019 poz. 1396 – Prawo ochrony środowiska, 2019
- [6] Rok J., Porozmawiajmy serio o zanieczyszczeniu powietrza w Polsce, 2016
- [7] Gulia S., Shiva Nagendra S. M., Khare M., Khanna I., Urban air quality management – A review, *Atmos. Pollut. Res.*, tom 6, 2/2015, str. 286–304
- [8] Adams K., Greenbaum D. S., Shaikh R., A. M. van Erp, Russell A. G., Particulate matter components, sources, and health: Systematic approaches to testing effects, *J. Air Waste Manage. Assoc.*, tom 65, 5/2015, str. 544–558
- [9] U.S. EPA. Integrated Science Assessment (ISA) For Particulate Matter, Washington, DC, 2009
- [10] International Agency for Research on Cancer (IARC), Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2016
- [11] Brunekreef B., Holgate S. T., Air pollution and health, *Lancet*, tom 360, nr 9341, październik 2002, str. 1233–1242
- [12] Raaschou-Nielsen O. i in., Air pollution and lung cancer incidence in 17 European cohorts: prospective analyses from the European Study of Cohorts for Air Pollution Effects (ESCAPE), *Lancet Oncol.*, tom 14, nr 9, sierpień 2013, str. 813–822
- [13] Seaton A., Godden D., MacNee W., Donaldson K., Particulate air pollution and acute health effects, *Lancet*, tom 345, nr 8943, styczeń 1995, str. 176–178
- [14] Salizzoni M. Bo, P., Clerico M., Buccolieri R., Assessment of indoor-outdoor particulate matter air pollution: A review, *Atmosphere (Basel)*, tom 8, 8/2017
- [15] Piasecki M., Kostyrko K., Pykacz S., Indoor environmental quality assessment: Part 1: Choice of the indoor environmental quality sub-component models, *J. Build. Phys.*, tom 41, 3/2017, str. 264–289
- [16] Piasecki M., Barbara Kostyrko K., Indoor environmental quality assessment, part 2: Model reliability analysis, *J. Build. Phys.*, tom 42, 3/2018, str. 288–315
- [17] Piasecki M., Bekierski D., Wpływ wybranych materiałów budowlanych na klasy czystości powietrza pomieszczeń, *Materiały Budowlane* 8/2017
- [18] PN-EN 16798-1:2019-06 Charakterystyka energetyczna budynków – Wentylacja budynków – Część 1: Parametry wejściowe środowiska wewnętrznego do projektowania i oceny charakterystyki energetycznej budynków w odniesieniu do jakości powietrza wewnętrznego, środowiska cieplnego, oświetlenia i akustyki 2019
- [19] Reizer M., Metodyka identyfikacji przyczyn występowania epizodów pyłowych w warunkach polskich, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2013
- [20] Kanakidou M. i in., Organic aerosol and global climate modelling: A review, *J. Atmos. Chem.*, tom 5, 2005, str. 1053–1123
- [21] Gieré R., Querol X., Solid Particulate Matter in the Atmosphere, *Elements*, tom 6, wrzesień 2010, str. 215–222
- [22] Bartyzel Jakub D. A., Frączkowski T., Pindel A., Łyczko P., Musielok M., Zięba D., Sprawozdanie z drugiej serii badań porównawczych urządzeń do pomiarów pyłu zawieszonego PM10 (urządzenia niereferencyjne i bez wykazanej równoważności do urządzeń referencyjnych), 2018
- [23] Bartyzel Jakub D. A., Frączkowski T., Pindel A., Łyczko P., Dąbrowska E., Sprawozdanie z badań porównawczych urządzeń do pomiarów pyłu zawieszonego PM10 (urządzenia niereferencyjne i bez wykazanej równoważności do urządzeń referencyjnych), 2018
- [24] PN-EN 16450:2017-05 Powietrze atmosferyczne – Automatyczne systemy pomiarowe do pomiarów stężenia pyłu zawieszonego (PM10; PM2.5), Polski Komitet Normalizacyjny, 2017
- [25] PN-EN 12341:2014-07 – Powietrze atmosferyczne – Standardowa gravimetryczna metoda pomiarowa do określania stężeń masowych frakcji PM10 lub PM2.5 pyłu zawieszonego, Polski Komitet Normalizacyjny, 2014
- [26] European Commission, Measuring air pollution with low-cost sensors, 2018
- [27] Adamiec E. i in., Using Medium-Cost Sensors to Estimate Air Quality in Remote Locations. Case Study of Niedzica, Southern Poland, *Atmosphere (Basel)*, tom 10, 7/2019, str. 393
- [28] Hodges N., Obszynska J., Lad C., Swaton R., Air quality management guidebook, 2008
- [29] Liu D., Zhang Q., Jiang J., Chen D.-R., Performance calibration of low-cost and portable particular matter (PM) sensors, *J. Aerosol Sci.*, tom 112, październik 2017, str. 1–10
- [30] Lv Y., Wang H., Wei S., Zhang L., Zhao Q., The Correlation between Indoor and Outdoor Particulate Matter of Different Building Types in Daqing, China, *Procedia Eng.*, tom 205, 2017, str. 360–367
- [31] Wang Z. i in., Comparison of real-time instruments and gravimetric method when measuring particulate matter in a residential building, *J. Air Waste Manage. Assoc.*, tom 66, 11/2016, str. 1109–1120
- [32] Wang X., Tian G., Yang D., Zhang W., Lu D., Liu Z., Responses of PM2.5 pollution to urbanization in China, *Energy Policy*, tom 123, grudzień 2018, str. 602–610
- [33] Yang D., Ye C., Wang X., Lu D., Xu J., Yang H., Global distribution and involvement of urbanization and PM2.5 (1998–2015), *Atmos. Environ.*, tom 182, czerwiec 2018, str. 171–178
- [34] Wang L., Fang B., Law R., Effect of air quality in the place of origin on outbound tourism demand: Disposable income as a moderator, *Tour. Manag.*, tom 68, październik 2018, str. 152–161
- [35] Sziget T., Kertész Z., Dunster C., Kelly F. J., Záray G., Mihucz V. G., Exposure to PM2.5 in modern office buildings through elemental characterization and oxidative potential, *Atmos. Environ.*, tom 94, maj 2014, str. 44–52
- [36] Fromme H. i in., Particulate matter in the indoor air of classrooms – exploratory results from Munich and surrounding area, *Atmos. Environ.*, tom 41, nr 4, luty 2007, str. 854–866
- [37] PN-EN ISO 14644-1:2016-03 Pomieszczenia czyste i związane z nimi środowiska kontrolowane – Część 1: Klasyfikacja czystości powietrza na podstawie stężenia cząstek, Polski Komitet Normalizacyjny, 2016