

Pomiary jakości powietrza na kampusie Politechniki Wrocławskiej za pomocą sieci czujnikowej

Air quality measurements on the Wrocław University of Science and Technology campus using a sensor network

Marek Badura, Izabela Sówka, Piotr Batog, Piotr Szymański^{*)}

Słowa kluczowe: zanieczyszczenia powietrza, pył zawieszony, czujniki niskobudżetowe

Streszczenie

W pracy przedstawiono sieć czujnikową do pomiarów zanieczyszczeń powietrza na terenie kampusu Politechniki Wrocławskiej. Opisano urządzenia czujnikowe do pomiarów frakcji pyłu $PM_{2,5}$, wykorzystujące niskobudżetowe czujniki optyczne PMS A003 firmy Plantower. Zaprezentowano również strukturę sieci zlokalizowanej na kampusie głównym i kampusach peryferyjnych. Opisano działanie systemu do informowania społeczności akademickiej i mieszkańców Wrocławia o jakości powietrza, a także przedstawiono przykładowe wyniki badań przeprowadzonych za pomocą urządzeń czujnikowych. Podczas epizodów podwyższonych stężeń $PM_{2,5}$, sygnały z czujników były zbieżne z wynikami pomiarów ze stacji państwowego monitoringu, a same urządzenia charakteryzowały się dobrą powtarzalnością wskazań pomiędzy poszczególnymi egzemplarzami. W przyszłości sieć może zostać rozszerzona o nowe czujniki do pomiarów zanieczyszczeń gazowych, np. ozonu.

Keywords: air pollution, particulate matter, low-cost sensors

Abstract

The paper presents a sensor network for the measurements of air pollution on the campus of Wrocław University of Science and Technology. Sensor devices for the measurement of the $PM_{2,5}$, using Plantower low-cost PMS A003 optical sensors, are described. The structure of the network located on the main campus and peripheral campuses is also presented. The operation of the system for informing the academic community and residents of Wrocław about air quality is described, and examples of the results of tests carried out with the sensor devices are presented. During episodes of elevated $PM_{2,5}$ concentrations, sensor signals were consistent with measurements from regulatory monitoring stations, and the devices showed high reproducibility between units. In the future, the network may be supplemented with new sensors for measuring gaseous pollutants such as ozone.

1. Wprowadzenie

Postęp w dziedzinie inżynierii elektronicznej doprowadził w ostatnich dziesięcioleciach do rozpowszechnienia technologii czujnikowych, a różnorodne czujniki stały się nieodzowną częścią współczesnego świata i stosowane są w wielu gałęziach życia.

W ujęciu metrologicznym, czujnikiem można nazwać urządzenie, które przetwarza pewien sygnał wejściowy (fizyczny lub chemiczny) na łatwy do zmierzenia sygnał wyjściowy (najczęściej elektryczny) [16]. Urządzenia tego typu wykorzystywane są powszechnie w komputerach i telefonach [41], środkach transportu [28], a także w budynkach, gdzie mogą stanowić część systemów bezpieczeństwa lub sterowania instalacjami [22, 31]. Obecnie, duży nacisk kładzie się na badania poświęcone czujnikom do zastosowań medycznych [42] oraz pojazdów autonomicznych [11].

Ponadto, dzięki rozwojowi technologii komunikacji bezprzewodowej, możliwe jest obecnie tworzenie sieci czujnikowych, czyli grup rozproszonych przestrzennie czujników (węzłów sieci), połączonych ze sobą za pomocą komunikacji bezprzewodowej. Dane pomiarowe

z węzłów przesyłane są do innych węzłów lub/i do wybranego punktu bazowego, który przesyła dane do serwera, w celu ich rejestracji i dalszej analizy [20]. Tego rodzaju układy pomiarowe stają się także integralną częścią miejskich systemów zarządzania dystrybucją energii [36] oraz systemów zaopatrzenia w media [8, 9] i wpisują się w koncepcję „inteligentnych miast” (ang. smart cities).

W dziedzinie inżynierii środowiska znaczącą rolę odgrywają czujniki do pomiarów parametrów środowiskowych [15]. Na uwagę zasługują tu czujniki do pomiarów różnorodnych substancji gazowych i pyłów [33, 18]. Czujniki tego typu charakteryzują się stosunkowo niewielkimi rozmiarami i mniejszym zapotrzebowaniem na energię elektryczną, w porównaniu do tradycyjnych urządzeń pomiarowych. Cena czujników jest najczęściej także kilkanaście-kilkadziesiąt razy niższa od ceny laboratoryjnej aparatury badawczej [3]. Z wymienionych powodów zainteresowanie czujnikami wzrosło istotnie w ostatnim dziesięcioleciu, a możliwości ich zastosowania są bardzo szerokie. Przykładowo, urządzenia czujnikowe mogą stanowić uzupełnienie konwencjonalnego systemu stacji monitoringu zanieczyszczeń powietrza. Mogą zatem zwiększyć rozdzielczość przestrzenną oraz czasową danych i dostar-

^{*)} **Marek Badura**, dr inż., Politechnika Wrocławska, Wydział Inżynierii Środowiska, Katedra Klimatyzacji, Ogrzewnictwa, Gazownictwa i Ochrony Powietrza, ul. Norwida 4/6, 50-370 Wrocław, marek.badura@pwr.edu.pl, autor do korespondencji

Izabela Sówka, dr hab. inż., Politechnika Wrocławska, Wydział Inżynierii Środowiska, Katedra Inżynierii Ochrony Środowiska, pl. Grunwaldzki 9, 50-384 Wrocław, izabela.sowka@pwr.edu.pl

Piotr Batog, dr inż., absolwent Politechniki Wrocławskiej, INSYSPOM, ul. Krzywoustego 6-12, 51-165 Wrocław, piotr.batog@insyspom.com

Piotr Szymański, dr inż., Politechnika Wrocławska, Wydział Informatyki i Telekomunikacji, Katedra Sztucznej Inteligencji, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, piotr.szymanski@pwr.edu.pl

czać nowych i istotnych informacji o stanie środowiska [16]. Czujniki mogą być przydatne do wykrywania obszarów o znacząco wyższym stopniu zanieczyszczenia (tzw. hot-spotów) [7] lub do detekcji ulotów (np. w instalacjach przemysłowych [32] lub z sieci gazowych i ropociągów [6, 1]). Dostępność tanich czujników umożliwia także ich wykorzystywanie w tzw. nauce obywatelskiej (ang. citizen science), gdzie badacze-wolontariusze pomagają gromadzić dane pomiarowe. Pozwala to podnosić świadomość społeczną na temat zanieczyszczeń powietrza i ich wpływu na zdrowie [26].

Problematyka złej jakości powietrza wciąż dotyczy wielu regionów świata. Jak wynika z raportów Europejskiej Agencji Środowiska, zanieczyszczenie powietrza pyłami zawieszonymi i wielopierścieniowymi węglowodarami aromatycznymi jest w Polsce jednym z najwyższych wśród państw Unii Europejskiej [12]. Sytuacja ta dotyczy wielu aglomeracji miejskich [35, 38], a także wielu mniejszych miejscowości, w tym uzdrowisk [21, 23, 27]. Epizody znaczącego pogorszenia jakości powietrza mają miejsce najczęściej w sezonie jesienno-zimowym i związane są przede wszystkim z użytkowaniem indywidualnych systemów grzewczych w gospodarstwach domowych [38]. Stosowanie mało efektywnych urządzeń grzewczych, spalanie paliw stałych złej jakości, a także spalanie odpadów, przyczynia się do emisji pyłów i szkodliwych gazów na niskiej wysokości (tzw. niska emisja) [24]. W przypadku dużej liczby takich emitorów, występujących na niewielkim obszarze, a także przy wystąpieniu niekorzystnych warunków meteorologicznych (brak wiatru i opadów), zanieczyszczenia kumulują się na ograniczonym obszarze i mogą powodować negatywne skutki zdrowotne [37]. W powszechnej świadomości tego rodzaju epizody pogorszonej jakości powietrza w sezonie grzewczym opisuje się jako smog, jednak należy podkreślić, że zjawisko smogu zimowego występuje w wyniku połączenia wspomnianych zanieczyszczeń z mgłą. Niestety, w wielu przypadkach zanieczyszczenia powietrza nie są widoczne gołym okiem i z tego powodu tak istotny jest ich monitoring.

Informowanie mieszkańców Wrocławia i społeczności akademickiej o jakości powietrza i jej wpływie na zdrowie było jedną z motywacji do stworzenia sieci czujnikowej na terenie kampusu Politechniki Wrocławskiej (PWr). Sieć ta została zaprojektowana i wykonana przez pracowników oraz absolwentów Wydziału Inżynierii Środowiska PWr, bazując na licznych doświadczeniach z pomiarami zanieczyszczeń powietrza, pracy z urządzeniami czujnikowymi i tworzeniu proekologicznych rozwiązań [2, 19, 17]. W artykule opisano urządzenia do pomiarów pyłu zawieszonego $PM_{2,5}$, system do informowania o stanie jakości powietrza oraz wyniki dotychczasowych badań.

2. Charakterystyka urządzeń czujnikowych

Do stworzenia sieci wykorzystano urządzenia czujnikowe nazwane MAQS (Mini Air Quality Station), których głównym elementem był czujnik optyczny PMS A003 firmy Plantower, służący do pomiarów pyłu zawieszonego. Czujnik ten wybrano z uwagi na stosunkowo niską cenę (ok. 100-150 zł w 2022 r.) oraz na podstawie wcześniejszych doświadczeń przeprowadzonych z udziałem innego czujnika tego producenta [2]. Czujniki tego typu działają na podstawie pomiaru intensywności światła rozproszonego na cząsteczkach aerozolu, a ilość rozpraszanego światła przeliczana jest na stężenie pyłu. Czujnik Plantower podłączono do mikrokomputera, który rejestrował dane i kontrolował pozostałe elementy urządzenia pomiarowego. Zebrane dane przesyłane były do sieci GSM przy pomocy zewnętrznej anteny.

Obudowa urządzenia MAQS miała kształt prostopadłościanu i została wydrukowana w technice 3D z tworzywa ABS, a całość przykryto daszkiem wykonanym z PVC. Całość wyposażono we wlot powietrza z filtrem z siatki metalowej oraz wylot powietrza, do którego przyłączony był wentylator osiowy. Nowatorskim rozwiązaniem było zastosowanie grzanego toru poboru próbek, który składał się z płytek grzejnych, sterowanych za pomocą wskazań dodatkowych czujników temperatury i wilgotności względnej. Element ten zapobiegał negatyw-

nemu wpływowi wysokiej wilgotności względnej na wyniki pomiarów. Wygląd urządzeń MAQS pokazano na r.ys. 1.



Rys. 1. Urządzenia pomiarowe MAQS (węzły sieci czujnikowej)

Fig.1. MAQS devices (sensor network nodes)

3. Lokalizacja urządzeń pomiarowych na kampusie PWr

Urządzenia MAQS rozmieszczone zostały na kampusie Politechniki Wrocławskiej (PWr), położonym w różnych miejscach miasta Wrocławia. Główny kampus znajduje się w rejonie Placu Grunwaldzkiego, na wschód od centrum Wrocławia, pomiędzy ulicami o dużym natężeniu ruchu. Budynek kampusu ograniczone są od południa ulicą Wybrzeże Wyspiańskiego i rzeką Odrą. W pobliżu nie ma dużych punktowych źródeł emisji pyłów, ale emisja pyłów może pochodzić z transportu oraz indywidualnych systemów grzewczych z pobliskich kamienic oraz z innych części miasta. W tej części kampusu urządzenia pomiarowe (14 szt.) rozmieszczone w pobliżu granic kampusu oraz w jego centrum.

6 urządzeń umieszczono na kampusach znajdujących się w pewnym oddaleniu od części głównej. Były to: kampus przy ul. Na Grobli (ok. 0.5 km od głównego kampusu, pomiędzy rzeką Odrą a Olawą), kampus ul. Gdańska (ok. 1 km od kampusu głównego, w obszarze zabudowy kamienicowej, w pobliżu cementarza), kampus ul. Prusa (ok. 1.1 km od kampusu głównego, w dzielnicy zdominowanej przez kamienice), kampus ul. Długa (zlokalizowany w północno-zachodniej części miasta, przy Odrze, ok. 3.7 km od kampusu głównego i oddalony od budynków mieszkalnych) oraz kampus ul. Wittiga (ok. 2 km od kampusu głównego, kompleks domów studenckich).

Urządzenia MAQS zostały umocowane na zewnętrznych parapetach pomieszczeń, balkonach lub dachach budynków. Większość czujników umieszczono na wysokościach ok. 2-4 m ponad poziomem terenu, jednak w przypadku dwóch budynków czujniki rozmieszczono także na innych wysokościach, w celu zbadania pionowego profilu rozkładu zanieczyszczeń.

4. Informowanie społeczności o jakości powietrza

Jednym z głównych zadań opracowanej sieci czujnikowej było informowanie społeczności akademickiej i mieszkańców Wrocławia o jak najbardziej aktualnym stanie jakości powietrza. Do tego celu stworzona została mapa z informacjami o stanie powietrza na portalu www.powietrze.pwr.edu.pl oraz animowane banery na stronie Wydziału Inżynierii Środowiska www.wis.pwr.edu.pl i stronie głównej PWr.

Osoba zainteresowana bieżącą informacją nt. jakości powietrza może wybrać na mapie konkretny punkt (budynek kampusu PWr) i wyświetlić informację o punkcie pomiarowym, stężeniu pyłu $PM_{2,5}$ (w $\mu\text{g}/\text{m}^3$) oraz przyporządkowanym wskaźnikowi jakości powietrza. W systemie wykorzystano kategorie Wrocławskiego Indeksu Powietrza, opracowanego przez Urząd Miejski we Wrocławiu [40]. Kolorystyczna wizualizacja danych oraz wyświetlane piktogramy mogą być przydatne przy planowaniu aktywności na świeżym powietrzu (np. spacer, jazda na rowerze) lub w wyborze środka transportu. Wszystkie przedstawiane na stronie projektu dane mają charakter godzinowych średnich kroczących, aktualizowanych co 15 minut. Ten sposób wyliczeń zapewnia dostarczanie aktualnych informacji o jakości powietrza bez znaczących opóźnień czasowych.

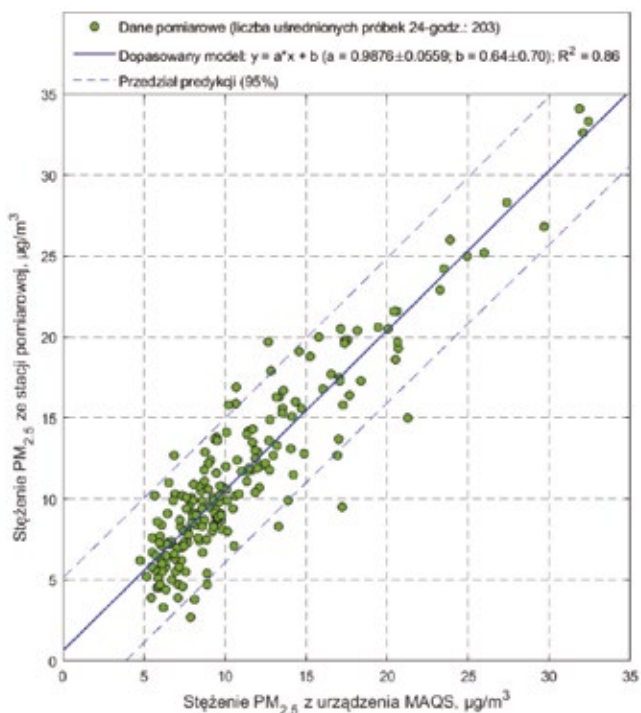
5. Przykładowe wyniki badań

W pierwszym etapie badań zweryfikowano powtarzalność działania urządzeń czujnikowych i porównano ich wskazania z wynikami pomiarów $PM_{2.5}$ z automatycznych stacji monitoringu Wojewódzkiego Inspektoratu Ochrony Środowiska (WIOŚ). Wyniki zaprezentowane w pracy [5] pokazały, że czujniki Plantower w urządzeniach MAQS charakteryzowały się bardzo dobrą powtarzalnością wskazań pomiędzy poszczególnymi egzemplarzami – współczynnik zmienności CV (ang. coefficient of variation) wynosił poniżej 10%, co jest wartością akceptowalną dla czujników niskobudżetowych [25]. Dla osiągnięcia jak najlepszej precyzji wskazań wprowadzono indywidualne współczynniki korekcyjne, które miały na celu dostosowanie sygnałów czujników do jednolitego poziomu.

W związku z przeprowadzoną analizą wyników pomiarów i danych ze stacji monitoringu, podjęto decyzję o kalibracji urządzeń czujnikowych. Weryfikacja poprawności procesu kalibracji została dokonana poprzez zestawienie wyników pomiarów gravimetrycznych $PM_{2.5}$ ze stacji WIOŚ na ul. Na Grobli ze wskazaniami jednego z urządzeń MAQS, zainstalowanego w bliskiej odległości tej stacji (~17 m), na terenie Miejskiego Przedsiębiorstwa Wodociągów i Kanalizacji (MPWiK Wrocław). Porównanie średnich dobowych z urządzenia czujnikowego z danymi referencyjnymi przedstawiono na rys. 2. Uzyskane parametry modelu regresji liniowej (współczynnik determinacji $R^2 = 0.86$, współczynnik kierunkowy $a \approx 0.99$ oraz wyraz wolny $b \approx 0.64$) wskazują, że przyjęte współczynniki kalibracji mogą dać zadowalające rezultaty w pomiarach $PM_{2.5}$ urządzeniami czujnikowymi.

W artykułach [4] i [5] opisano wyniki pomiarów czujnikowych podczas kilku epizodów podwyższonych stężeń $PM_{2.5}$. W pracach wskazano na zasadność stosowania sieci czujnikowej, z uwagi na zróżnicowanie stężeń zmierzonych w różnych częściach kampusu. Przykładową wizualizację występujących klas jakości powietrza pokazano na rys. 3.

Szczegółowej analizie poddano także korelacje pomiędzy węzłami sieci. Badania wykazały wyraźne różnice w wynikach pomiarów, które zależały od lokalizacji węzłów czujnikowych. Generalnie, węzły zlokalizowane w centralnej części kampusu miały najwyższe korelacje z innymi jednostkami z tego obszaru, a czujniki z peryferyjnych kampusów znacznie różniły się od jednostek z głównego kampusu. Na podstawie otrzymanych wyników określono ogólną wytyczną do budowy sieci czujnikowych, polegającą na tym, by umieścić węzeł

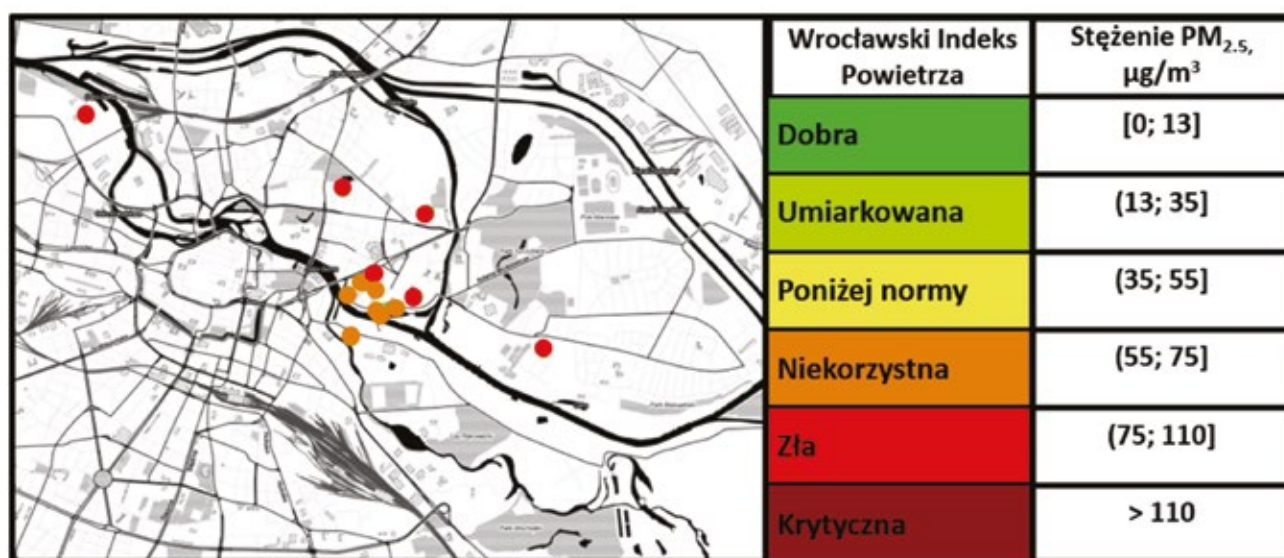


Rys. 2. Porównanie danych z urządzenia MAQS (średnie dobowe) z wynikami pomiarów gravimetrycznych ze stacji pomiarowej WIOŚ

Fig. 2. Comparison of MAQS data (daily averages) with gravimetric measurements from the WIOŚ measuring station

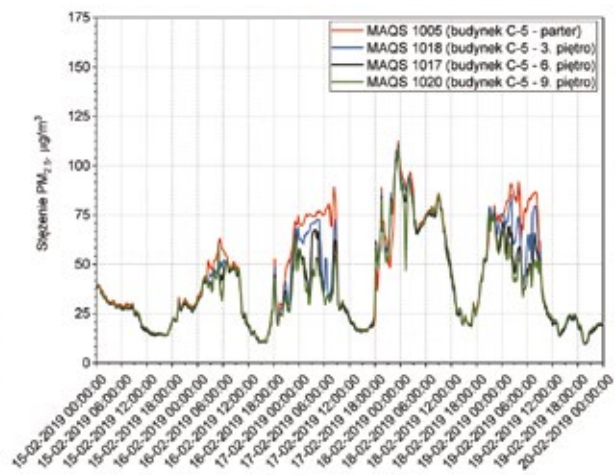
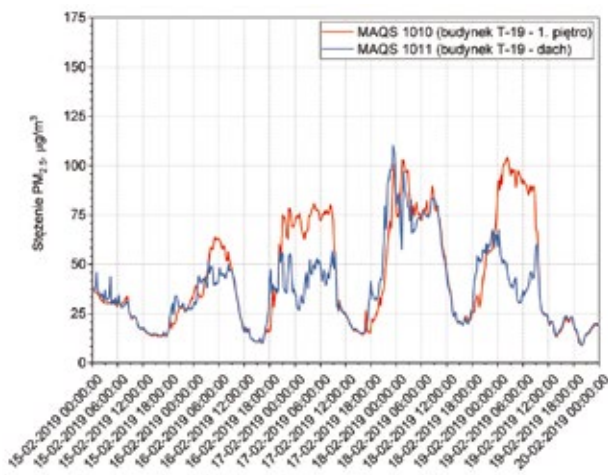
w centrum monitorowanego obszaru a zestaw innych węzłów na granicach obszaru i/lub na peryferiach [5].

Interesujące wyniki otrzymano z węzłów sieci rozmieszczonych pionowo, na różnych wysokościach (budynek C-5 w centrum kampusu głównego oraz akademik T-19 na kampusie na ul. Wittiga). W trakcie występowania epizodów podwyższonych stężeń $PM_{2.5}$ notowane stężenia były niekiedy nawet 4-krotnie wyższe w dolnych partiach budynków niż na najwyższych piętrach (przykłady na rys. 4). Duża rozbieżność w poziomach stężeń występowała jednak jedynie, gdy obserwowana była silna inwersja temperatur, tj. temperatury w dolnych partiach budynków były niższe niż przy ich górnych częściach. Zjawi-

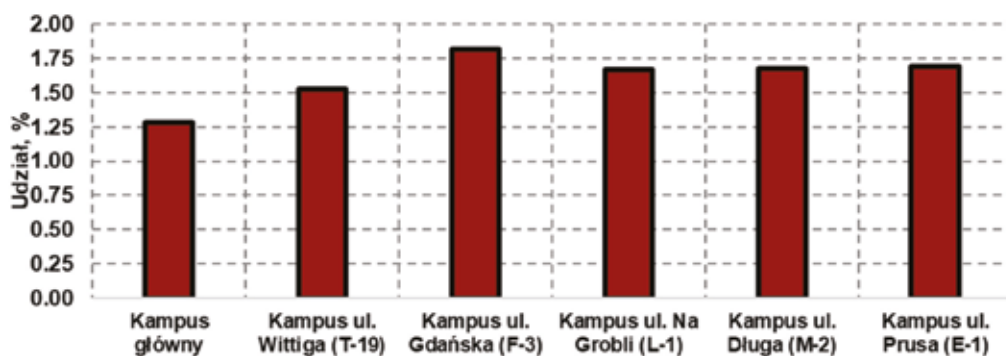


Rys. 3. Przykład zróżnicowania przestrzennego klas jakości powietrza podczas epizodu podwyższonych stężeń $PM_{2.5}$ (19-02-2019 godz.00:00)

Fig. 3. Example of spatial variation in air quality classes during an episode of elevated $PM_{2.5}$ concentrations (19-02-2019 00:00)



Rys. 4. Przykłady wyników pomiarów podczas epizodów podwyższonych stężeń $PM_{2,5}$ dla urządzeń czujnikowych rozmieszczonych na różnych wysokościach budynków
 Fig. 4. Examples of measurement results during episodes of elevated $PM_{2,5}$ concentrations for sensor devices located at different building heights



Rys. 5. Udział procentowy sumarycznych wystąpień „złej” i „krytycznej” jakości powietrza dla pełnych godzin zegarowych w sezonach zimowych w latach 2019-2021

Fig. 5. Percentage of total 'poor' and 'critical' air quality occurrences for full clock hours during the winter seasons in 2019-2021

ska to powodowało zahamowanie pionowych ruchów mas powietrza, co stwarzało niekorzystne warunki do rozpraszania zanieczyszczeń i powodowało ich kumulację w pobliżu gruntu [5].

Pomimo tego, że wspomniane epizody podwyższonych stężeń $PM_{2,5}$ mogą powodować negatywne skutki zdrowotne u grup szczególnego ryzyka (dzieci, osoby starsze [30]), częstotliwość ich występowania w ostatnich latach nie była duża. Analiza wskazań czujników, wykonana dla okresów grzewczych dla lat 2019-2021, wykazała, że udział procentowy występowania łącznie „złej” i „krytycznej” jakości powietrza (wg Wrocławskiego Indeksu Powietrza, wyliczonego dla pełnych godzin zegarowych) nie przekraczał 2% (rys. 5). Wymienione klasy powietrza najrzadziej występowały na obszarze kampusu głównego (~1,25%). Większą częstotliwość zanotowano natomiast na kampusach peryferyjnych, w tym największą na ul. Gdańskiej (ponad 1,75% wystąpień).

Stosunkowo rzadkie występowanie epizodów „złej” i „krytycznej” jakości powietrza w sezonach grzewczych może mieć wiele przyczyn. Na zmniejszenie emisji pyłów z systemów ogrzewania wpływać mogą rosnąca świadomość ekologiczna społeczeństwa, zmiany legislacyjne związane ze stosowaniem określonych rodzajów paliwa i kotłów [14] oraz programy wsparcia związane z wymianą źródeł ciepła [34]. Najistotniejszym czynnikiem wydają się jednak zmiany klimatyczne, skutkujące wzrostem temperatur w okresach zimowych [39, 10] i co za tym idzie, zmniejszonym zużyciem paliw stałych w indywidualnych systemach grzewczych.

Z uwagi na procesy związane z ocieplaniem się klimatu, w kolejnych latach problematyka epizodów podwyższonych stężeń zanieczyszczeń powietrza może zacząć dotyczyć w większym stopniu sezonu letniego oraz emisji zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych. Wzrost liczby dni upalnych i tzw. fal ciepła może sprzyjać

tworzeniu się ozonu troposferycznego, który także wpływa negatywnie na organizmy żywe [29].

Autorzy niniejszej publikacji podjęli się także badań nad testowaniem czujników do pomiaru ozonu, które mogłyby zostać wykorzystane do rozbudowy sieci czujnikowej na kampusie PWr. Wyniki badań opublikowane zostały w artykule [3] i pozwoliły na wytypowanie najbardziej odpowiednich urządzeń do tego celu.

6. Podsumowanie

W publikacji scharakteryzowano sieć czujnikową służącą do monitorowania stężeń zanieczyszczeń na terenie kampusu Politechniki Wrocławskiej. Urządzenia pomiarowe i struktura sieci zostały opracowane przez pracowników oraz absolwentów Wydziału Inżynierii Środowiska PWr. Do pomiarów wykorzystano niskobudżetowe czujniki optyczne PMS A003 firmy Plantower, które charakteryzują się dobrą powtarzalnością wskazań pomiędzy poszczególnymi egzemplarzami. Ponadto, wyniki pomiarów z czujników były zbliżone z wynikami pomiarów ze stacji państwowego monitoringu, a wszystkie urządzenia czujnikowe były w stanie wskazywać podwyższone poziomy stężeń $PM_{2,5}$.

Największą przydatnością sieci czujnikowej jest dostarczanie społeczności akademickiej PWr i mieszkańcom Wrocławia aktualnych i specyficznych dla danego miejsca informacji o jakości powietrza. Informowanie o stanie jakości powietrza realizowane jest poprzez dedykowaną stronę internetową z mapą z kolorowymi punktami i piktogramami, gdzie wyniki pomiarów aktualizowane są co 15 minut.

Zaprezentowana sieć czujnikowa umożliwia monitorowanie jakości powietrza z dużą rozdzielczością przestrzenną, w tym także w profilu pionowym. W przyszłości planowane jest rozszerzenie systemu o czujniki do pomiaru zanieczyszczeń gazowych, takich jak ozon. ■

LITERATURA

- [1] BAdegboye, M.A.; Fung, W.-K.; Karnik, A. 2019. "Recent Advances in Pipeline Monitoring and Oil Leakage Detection Technologies: Principles and Approaches". *Sensors*, 19(11), 2548.
- [2] Badura, M.; Batog, P.; Drzeniecka-Osiadacz, A. 2018. "Modzel, P. Evaluation of low-cost sensors for ambient PM_{2.5} monitoring". *Journal of Sensors*, 5096540.
- [3] Badura, M.; Batog, P.; Drzeniecka-Osiadacz, A.; Modzel, P. 2022. "Low – and Medium-Cost Sensors for Tropospheric Ozone Monitoring—Results of an Evaluation Study in Wrocław, Poland". *Atmosphere*, 13, 542.
- [4] Badura, M.; Sówka, I.; Batog, P.; Szymański, P.; Dąbrowski, Ł. 2019. Sensor network for PM_{2.5} measurements on an academic campus area. E3S Web Conf., 116, 00004.
- [5] Badura, M.; Sówka, I.; Szymański, P.; Batog, P. 2020. "Assessing the usefulness of dense sensor network for PM_{2.5} monitoring on an academic campus area". *Science of The Total Environment*, Volume 722, 137867.
- [6] Barchyn, T.E.; Hugenholtz, Ch.H.; Fox, T.A. 2019. "Plume detection modeling of a drone-based natural gas leak detection system". *Elementa: Science of the Anthropocene*, 7:41.
- [7] Bousiotis, D.; Beddows, D.C. S.; Singh, A.; Haugen, M.; Diez, S.; Edwards, P.M.; Boies, A.; Harrison, r.M.; Pope, F.D. 2022. A study on the performance of low-cost sensors for source apportionment at an urban background site. *Atmospheric Measurement Techniques*, 15, 4047–4061.
- [8] Brodziak, R.; Urbaniak, A. 2019. "Zarządzanie i monitoring systemu zaopatrzenia w wodę w inteligentnym mieście". *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* (5): 165-171.
- [9] Bylka, J.; Schiller, T.; Szuster-Janiaczyk, A. 2016. "Wybrane aspekty zarządzania systemami zaopatrzenia w wodę, jako element „Smart city”. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* (4): 122-127.
- [10] Canales, F.A.; Jadwiszczak, P.; Jurasz, J.; Wdowikowski, M.; Ciapala B.; Kazmierczak, B. 2020. "The impact of long-term changes in air temperature on renewable energy in Poland". *Science of The Total Environment*, Vol. 729, 138965.
- [11] Długosz, M.; Roman, M.; Węgrzyn, P. 2021. "System sterowania autonomicznego pojazdu A-EVE". *Przegląd Elektrotechniczny*, 97 (8): 42-47.
- [12] European Environment Agency, Europe's air quality status 2022, Briefing no. 04/2022, <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2022> (dostęp 29.12.2022)
- [13] Feinberg, S.N.; Williams, r.; Hagler, G.; Low, J.; Smith, L.; Brown, r.; Garver, D.; Davis, M.; Morton, M.; Schaefer, J.; Campbell J. 2019. "Examining spatiotemporal variability of urban particulate matter and application of high-time resolution data from a network of low-cost air pollution sensors". *Atmospheric Environment*, 213, 579–584.
- [14] Gołoś, K.; Ciupek, B.; Judt, W.; Urbaniak, r. 2021. "Wpływ wymiany kotłów grzewczych opalanych paliwem stałym na jakość powietrza w Polsce w latach 2000-2020". *Przemysł Chemiczny*, T. 100 (5): 486-489.
- [15] Hart, J.K.; Martinez, K. 2006. "Environmental Sensor Networks: A revolution in the earth system science?" *Earth-Science Reviews*, Volume 78, Issues 3–4, 177-191.
- [16] Javid, M.; Haleem, A.; Rab, S.; Singh, r.P. 2021. "Suman, r. Sensors for daily life: A review". *Sensors International*, Volume 2, 100121.
- [17] Jedlikowski, A.; Englart, S.; Cepiński, W.; Badura, M.; Sayegh, M.A. 2020. "Reducing energy consumption for electrical gas preheating processes." *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 19, art. 100600, s. 1-13.
- [18] Jońca, J.; Pawnuik, M.; Arsen, A.; Sówka, I. 2022. "Electronic Noses and Their Applications for Sensory and Analytical Measurements in the Waste Management Plants—A Review". *Sensors*, 22, 1510.
- [19] Jońca, J.E.; Miller, U.; Sówka, I. 2022. "Aktualne rozwiązania w zakresie czujników stosowanych w pomiarach substancji zapachowych". *Wodociągi, Kanalizacja* (11): 16-20.
- [20] Kandris, D.; Nakas, C.; Vomvas, D.; Koulouras, G. 2020. "Applications of Wireless Sensor Networks: An Up-to-Date Survey". *Applied System Innovation*, 3(1):14.
- [21] Kobus, D.; Merenda, B.; Sówka, I.; Chlebowska-Styś, A.; Wroniszewska, A. 2020. "Ambient Air Quality as a Condition of Effective Healthcare Therapy on the Example of Selected Polish Health Resorts". *Atmosphere* 11(8):882.
- [22] Koziorowska, A.; Potyrała, D.; Macek, M.; Krasowski, r. 2021. "The smart home systems projects based on the Arduino platform". *Przegląd Elektrotechniczny*, r. 98, nr 1, 88-91.
- [23] Kuchcik, M. 2020. "Zanieczyszczenie powietrza w uzdrowiskach polskich – problem gmin uzdrowiskowych oraz kuracjuszy". *Przegląd Geograficzny*, 92 (1): 109–134.
- [24] Kwilosz, T.; Filar, B.; Miziołek, M. 2022. "Analiza zanieczyszczenia powietrza atmosferycznego pyłami charakterystycznymi dla niskiej emisji". *Nafta-Gaz* (9){641–653.
- [25] Levy Zamora, M.; Xiong, F.; Gentner, D.; Kerkez, B.; Kohrman-Glaser, J.; Koehler, K. 2019. "Field and laboratory evaluations of the Low-cost Plantower particulate matter sensor". *Environmental Science & Technology*. 53 (2):838-849.
- [26] Lu, T.; Liu, Y.; Garcia, A.; Wang, M.; Li, Y.; Bravo-Villasenor, G.; Campos, K.; Xu, J.; Han, B. 2022. "Leveraging Citizen Science and Low-Cost Sensors to Characterize Air Pollution Exposure of Disadvantaged Communities in Southern California". *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(14):8777.
- [27] Merenda, B.; Maciejewski, P.; Bezyk, Y.; Sówka, I. Indoor Air Quality in a Selected Health Resort Facility: Analysis of PM10, PM_{2.5} and 222Rn Concentrations. *Journal of Ecological Engineering*, 23(10):202-215.
- [28] Mohankumar, P.; Ajayan, J.; Yasodharan, r.; Devendran, P.; Sambasivam, R. 2019. "A review of micromachined sensors for automotive applications". *Measurement Volume* 140, 305-322.
- [29] Nuvolone, D.; Petri, D.; Voller, F. 2018. "The effects of ozone on human health". *Environmental Science and Pollution Research volume*, 25, 8074–8088.
- [30] Olstrup, H.; Åström, C.; Orru, H. 2022. "Daily Mortality in Different Age Groups Associated with Exposure to Particles, Nitrogen Dioxide and Ozone in Two Northern European Capitals: Stockholm and Tallinn". *Environments* (9) 83.
- [31] Owczarczak, r.; Żyłka, P. 2021. "Harvesting energii jako metoda bezbaterijnego zasilania zdalnych układów czujnikowych w budynkach z systemem zarządzania BMS". *Przegląd Elektrotechniczny*. 97 (7): 120-125.
- [32] Palacin, J.; Martínez, D.; Clotet, E.; Pallejà, T.; Burgués, J.; Fonollosa, J.; Pardo, A.; Marco, s. . 1957 "Application of an Array of Metal-Oxide Semiconductor Gas Sensors in an Assistant Personal Robot for Early Gas Leak Detection". *Sensors*, 19.
- [33] Rai, A.C.; Kumar, P.; Pilla, F.; Skouloudis, A.N.; Di Sabatino, S.; Ratti, C.; Yasar, A.; Rickerby, D. 2017. "End-user perspective of low-cost sensors for outdoor air pollution monitoring". *Science of The Total Environment*, Vol. 607–608, 691–705.
- [34] Ryńska, J. 2022. "Programy wsparcia dla urządzeń grzewczych". *Rynek Instalacyjny*, (3):31-34.
- [35] Sówka, I.; Chlebowska-Styś, A.; Pachurka, Ł.; Rogula-Kozłowska, W.; Mathews, B. 2019. "Analysis of Particulate Matter Concentration Variability and Origin in Selected Urban Areas in Poland". *Sustainability*, 11(20):5735.
- [36] Świątek, J.; Kazirodek, P. 2020. "Systemy zarządzania dystrybucją energii w energetyce rozproszonej". *Elektro Info* (5):62-65.
- [37] Tałach, Z.A.; Stachurek, I. 2020. "Zagrozenie zdrowia człowieka na skutek oddziaływania smogu w naszym kraju". *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* (2):5-9.
- [38] Thunis, P.; Pisoni, E.; Bessagnet, B.; Wilson, J.; Vignati, E.; De Meij, A.. Mascherpa, A. 2021. Urban PM_{2.5} Atlas, EUR 30829 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- [39] Tomczyk, A.M.; Bednorz, E.; Szyga-Pluta, K. 2021. "Changes in Air Temperature and Snow Cover in Winter in Poland". *Atmosphere* (12)68.
- [40] Wrocławski Indeks Powietrza, <https://www.wroclaw.pl/zielony-wroclaw/wroclawski-indeks-powietrza> (dostęp: 04.01.2023).
- [41] Zielonka, J.; Sułowicz, M.; Czechowski, M. 2021. "Analiza możliwości wykorzystania sensorów zabudowanych w smartfonach w systemach diagnostycznych". *Napędy i Sterowanie* 23 (11): 70-75.
- [42] Zin, M.S.I.M.; Mustafah, M.A.K.; Arith, F.; Isa, A.A.M.; Barukang, L.; Markarian, G. 2022. "Development of Low-Cost IoT-Based Wireless Healthcare Monitoring System". *Przegląd Elektrotechniczny*, 1 (1): 222-227.