

## Rozproszony system pomiaru zanieczyszczeń powietrza

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono koncepcję systemu pomiarów zanieczyszczeń powietrza, wykorzystującego bezzałogowe statki powietrzne oraz bezobsługowe czujniki tworzące sieć zbierającą dane. Monitorowane są: stężenie pyłów zawieszonych, CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, formaldehyd, lotne związki organiczne na różnych wysokościach oraz w różnych miejscach obszarów miejskich. Przede wszystkim wykorzystywane są czujniki działające na zasadzie rozpraszania światła przez cząsteczki zawieszony w powietrzu. Stosuje się także technikę pobierania próbek powietrza za pomocą rurek sorpcyjnych z odpowiednim wypełnieniem w celu przeprowadzenia dokładnych analiz, np. chromatograficznych, w stacjonarnym laboratorium. Zebrane dane są gromadzone i analizowane na serwerze WWW, a następnie nanoszone na interaktywną mapę.

**Abstract.** In the article the concept of an air pollution measurement system that uses unmanned aerial vehicles and maintenance-free sensors that form a data collecting network, is presented. The following parameters are monitored: the concentration of particulate matter, CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, formaldehyde, volatile organic compounds at different altitudes and in different places in urban areas. First of all, sensors are used that scatter light by particles suspended in the air. The technique of air sampling with the use of sorption tubes with an appropriate packing is used to perform precise analyses, e.g. chromatographic ones, in a stationary laboratory. The data is collected and analyzed on a web server, and then marked on an interactive map. (**Distributed air pollution measurement system**).

**Słowa kluczowe:** zanieczyszczenia powietrza, rozproszony system pomiarowy, rurki sorpcyjne, analiza chromatograficzna, pomiar rozpraszania światła.

**Keywords:** air pollution, distributed measurement system, sorption tubes, chromatography analysis, light scattering measuring.

### 1. Wstęp

W ostatnich latach bardzo wzrosła świadomość społeczeństwa w zakresie wpływu zanieczyszczeń powietrza na zdrowie ludzi i długość życia. Informacje na temat jakości powietrza, którym oddychamy, coraz częściej pojawiają się w ogólnodostępnych mediach [1]. Bardzo często mają one postać raportów o stężeniu pyłów zawieszonych występujących na różnych obszarach, zwykle w miastach, gdzie takie stężenia są największe.

Rosnące zainteresowanie tą tematyką jest związane z dowiedzionym wpływem czasu ekspozycji organizmu ludzkiego na zanieczyszczone powietrze a występowaniem negatywnych efektów zdrowotnych. Badania w tym zakresie intensywnie prowadzi się od połowy ubiegłego wieku [2]. Jednak dopiero w ostatnim dziesięcioleciu pojawiły się powszechnie dostępne przyrządy pomiarowe (czujniki oparte na rozpraszaniu światła przez cząsteczki zawieszony w powietrzu). Dzięki nim ciągle pomiar podstawowych parametrów jakościowych powietrza stał się powszechny.

W niniejszej pracy skupiono się na zaproponowaniu rozproszonego systemu pomiarowego do badania zanieczyszczeń powietrza w różnych, także trudnodostępnych miejscach. W oparciu o zebrane dane jest możliwe prognozowanie stężeń zanieczyszczeń i ostrzeganie społeczeństwa o spodziewanym przekroczeniu obowiązujących norm.

Badania są prowadzone z wykorzystaniem bezzałogowego statku powietrznego (drona), wyposażonego w aparaturę do pobierania próbek powietrza z różnych miejsc na różnych wysokościach. Dron jest także wyposażony w czujniki do bezpośrednich pomiarów jakości powietrza. Dzięki temu można bezpośrednio uzyskiwać więcej danych. Wykorzystywane czujniki mogą być także pozostawiane w różnych miejscach (np. po wyniesieniu przez drona). Dane pomiarowe są bieżąco przesyłane do centralnego serwera za pomocą systemu sieci telekomunikacji komórkowej.

W rozdziale 2. przedstawiono źródła zanieczyszczeń powietrza, ich charakterystykę oraz wpływ na człowieka. W rozdziale 3. opisano koncepcję opracowywanego systemu. W rozdziale 4. znajduje się opis metody i analizy poboru próbek powietrza z wykorzystaniem drona. W kolejnym rozdziale opisano proponowane stacje pomiarowe, wyko-

zystujące czujniki czystości powietrza. Rozdział 6. przedstawia metody gromadzenia i analizy uzyskanych wyników. Podsumowanie badań zawiera rozdział 7.

### 2. Zanieczyszczenia powietrza

Ze względu na wpływ emisji szkodliwych związków chemicznych zarówno pochodzenia antropogenicznego, jak i naturalnego, skład powietrza ulega ciągłym zmianom. Substancje chemiczne uwalniane do atmosfery wpływają na jakość powietrza, a tym samym na zdrowie ludzi i zwierząt [3]. Rodzaje zanieczyszczeń powietrza atmosferycznego, pod kątem ich stanu skupienia, można podzielić na: aerozole, pyły zawieszony oraz zanieczyszczenia gazowe, do których należą przede wszystkim tlenki azotu (N<sub>x</sub>O<sub>y</sub>), dwutlenek siarki (SO<sub>2</sub>), siarkowodór (H<sub>2</sub>S), tlenek i dwutlenek węgla (CO, CO<sub>2</sub>) oraz lotne związki organiczne (VOC). Niektóre z emitowanych do atmosfery związków są rakotwórcze, jak np. benzen i benzo(a)piren z grupy wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA) [4, 5]. Pyły zawieszony, np. PM<sub>10</sub> i PM<sub>2,5</sub>, składają się z cząstek zawieszonych w powietrzu, będących mieszaniną substancji organicznych i nieorganicznych. Pył PM<sub>10</sub> zawiera cząstki o średnicy nie większej niż 10 mikrometrów, które mogą docierać do górnych dróg oddechowych i płuc. Poziom dopuszczalny dla stężenia średniodobowego wynosi 50 µg/m<sup>3</sup> i nie może być przekraczany częściej niż 35 dni w ciągu roku. Poziom dopuszczalny dla stężenia średniorocznego wynosi 40 µg/m<sup>3</sup>. Pył PM<sub>2,5</sub> zawiera zaś cząstki o średnicy nie większej niż 2,5 mikrometra, które mogą docierać do górnych dróg oddechowych, płuc oraz przenikać bezpośrednio do krwi. Dopuszczalny poziom dla stężenia PM<sub>2,5</sub> średniorocznego wynosi 20 µg/m<sup>3</sup> [6].

Emisja zanieczyszczeń antropogenicznych jest nieodłącznie związana z procesami produkcyjnymi i warunkami życia człowieka. Szczególnie dużo substancji szkodliwych powstaje podczas spalania paliw stałych, w procesach przemysłowych oraz w wyniku intensywnego transportu drogowego i lotniczego. W obrębie aglomeracji miejskich szczególnie uciążliwa jest niska emisja gazów i pyłów zawieszonych (PM<sub>10</sub> i PM<sub>2,5</sub>) zanieczyszczających powietrze, tj. emisja, której źródło znajduje się nie wyżej niż 30 m.

Jej przyczyną jest najczęściej spalanie w paleniskach domowych paliw stałych niskiej jakości. Powoduje ona znaczne pogorszenie jakości powietrza w skali lokalnej [7].

Związek między niekorzystnymi skutkami zdrowotnymi a niską jakością powietrza został wyraźnie wykazany, a zanieczyszczenie powietrza uznano za dziewiąty co do wielkości czynnik ryzyka dla zdrowia na świecie [8].

Organizm ludzki może reagować na substancje toksyczne w sposób ostry, jeśli jednorazowo zostanie poddany działaniu dużej dawki takiej substancji, bądź chroniczny, jeśli małe dawki substancji toksycznej są podawane przez długi czas [8]. Reakcja organizmu może być także utajona – wówczas skutki zdrowotne są widoczne dopiero po długim czasie. Stężenie poszczególnych rodzajów zanieczyszczeń w powietrzu zależy nie tylko od tego jak wiele emituje się ich do atmosfery, ale także od warunków geograficznych na danym obszarze. Szczególnie narażone są miejscowości położone w zagłębieniach terenu, jak np. Kraków leżący w dolinie Wisły pomiędzy wzniesieniami Bramy Krakowskiej i Pogórza Zachodniobeskidzkiego. Zanieczyszczenia pochodzące z licznych zakładów przemysłowych, silników samochodowych i domowych pieców opalanych węglem (często niskiej jakości) nie mogą się rozwiać, gdyż naturalne przewietrzanie jest utrudnione. W związku z tym Kraków uplasował się na 3. miejscu w rankingu miast Unii Europejskiej o najbardziej zanieczyszczonym powietrzu [9].

Monitorowanie jakości powietrza wymusza wielotorowe działania ograniczające emisję zanieczyszczeń do atmosfery. Część działań jest prowadzona lub dofinansowywana przez lokalne władze i przynosi wymierne rezultaty. We wspomnianym Krakowie tylko w 2019 r. zlikwidowano ponad 4 tysiące domowych piecyków (tzw. „kopciuchów”) opalanych różnorodnym paliwem stałym, a od września tego samego roku wprowadzono zakaz palenia drewnem i węglem [10]. Między innymi z tego powodu uzyskano spadek liczby dni ze stężeniem pyłu zawieszonego PM10 powyżej poziomu  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ze 104 w roku 2018, przez 64 w roku 2019 do 49 dni w roku ubiegłym [11].

Jak podaje Główny Inspektorat Ochrony Środowiska [12], w Polsce w latach 2011–2017 średnie stężenie pyłu PM10 utrzymywało się na mniej więcej stałym poziomie około  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , przy czym w sezonie zimowym było większe o około  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Jednakże najwyższa koncentracja stężeń pokrywa się z mapą większych miast, szczególnie tych będących głównymi ośrodkami przemysłowymi (Górny Śląsk, Warszawa, Łódź). Najmniejsze stężenia są notowane na Wybrzeżu, gdzie są najsilniejsze wiatry. Niestety, dane z 2015 r. pokazują, że ludność Polski jest zdecydowanie bardziej narażona na ponadnormatywne oddziaływanie pyłu PM10 niż średnio ludność innych krajów europejskich.

W Polsce sukcesywnie rośnie liczba stacji mierzących jakość powietrza. Główny Inspektorat Ochrony Środowiska podaje, że pomiędzy rokiem 2008 a 2018 liczba stacji pomiarowych dla pyłów PM2,5 i PM10 zwiększyła się prawie trzykrotnie do przeszło 450 [13].

Coraz więcej firm oferuje także komercyjne urządzenia i gotowe systemy pomiaru zanieczyszczeń powietrza, które mogą być częściowo dofinansowane. Przykładem takiej firmy działającej na polskim rynku jest Airly [14]. Oprócz tego amatorzy działający w ramach Sensor.community (Luftdaten) [15] konstruują własne stacje pomiarowe i udostępniają zbierane dane na bieżąco w Internecie. W 2019 r. w Polsce działało 340 amatorskich stacji monitorujących stężenia pyłów PM2,5 i PM10.

Ze względu na występujące lokalnie zróżnicowanie poziomów stężeń zanieczyszczeń powietrza i wciąż niewielką liczbę stacji pomiarowych istnieje dalsza konieczność rozwoju sieci czujników i zbiorczego analizowania pochodzących z nich danych.

Coraz częściej bada się również możliwość przystosowania bezzałogowych statków powietrznych do przenoszenia sprzętu kontrolno-pomiarowego w celu zbierania danych z wielu punktów lub pobierania próbek do dalszej analizy w stacjonarnym laboratorium. Rozwiązanie takie jest szczególnie przydatne w miejscach niebezpiecznych lub trudno dostępnych, gdzie szczegółowe informacje o charakterystyce rozkładu aerozoli i stężeniach zanieczyszczeń gazowych są potrzebne do wyznaczenia wpływu zanieczyszczeń na środowisko oraz zdrowie ludzi [16, 17].

### 3. Koncepcja systemu pomiarowego

Opisany system wykonuje zarówno bieżące pomiary (on-line) jak i pobiera próbki powietrza w celu dalszej analizy w laboratorium stacjonarnym (off-line). Układy analizy i poboru próbek są przenoszone z użyciem drona H520E firmy Yuneec (Chiny). Wybrany model bezzałogowego statku powietrznego charakteryzuje się wystarczającym udźwigniem wynoszącym około 640 g (bez kamery). Sześć silników zasilanych akumulatorem o pojemności 6200 mAh zapewnia czas lotu wynoszący około 25 minut. Dron ten jest także wyposażony w stację pomiarową mierzącą m.in.: stężenia formaldehydu, pyłów PM1, PM2,5, PM10, tlenku węgla (CO), dwutlenku węgla (CO<sub>2</sub>), dwutlenku azotu (NO<sub>2</sub>), wodoru (H<sub>2</sub>), amoniaku (NH<sub>3</sub>), metanu (CH<sub>4</sub>), lotnych związków organicznych (TVOC), a także temperaturę i wilgotność powietrza. Dzięki poborowi próbek powietrza i wykonaniu pomiarów z użyciem ww. czujników jest możliwa poprawa precyzji takich pomiarów.

Podobnie wyposażone autonomiczne stacje pomiarowe, posiadające własne zasilanie, przesyłają bezprzewodowo dane do centralnego serwera przy wykorzystaniu sieci telefonii komórkowej. Planujemy rozmieszczać takie stacje w różnych miejscach miasta, w tym na dachach budynków (gdzie nie będą narażone na kradzieże i dewastacje) oraz na pojazdach komunikacji miejskiej, które wielokrotnie w ciągu dnia pokonują te same trasy. W ten sposób będą zbierane dane, które następnie będą przesyłane za pomocą protokołu HTTP [18] do serwera WWW opracowanego w technologii Node.js. Dane pomiarowe są zapisywane w relacyjnej bazie danych MySQL. Na ich podstawie, przy wykorzystaniu zbioru funkcji *Google Maps JavaScript API V3* [19], jest generowana dynamiczna mapa zanieczyszczeń.

### 4. Metoda poboru próbek powietrza

Koncepcja opracowanej metody pomiarowej polega na wielu bezpośrednich pomiarach za pomocą niskokosztowych czujników a następnie na udokładnianiu tych wyników za pomocą stosunkowo małej liczby precyzyjnych, lecz bardziej kosztownych, porównawczych analiz laboratoryjnych pobranych próbek powietrza. Taki hybrydowy system umożliwia uzyskanie wielu precyzyjnych wyników pomiarowych o dużej gęstości czasoprzestrzennej przy zachowaniu małych kosztów. Zarówno pomiary bezpośrednie jak i pobór próbek do późniejszej analizy laboratoryjnej odbywają się za pomocą stacji mobilnych umieszczanych na bezzałogowym statku powietrznym oraz na pojazdach komunikacji miejskiej.

Analizowane są zarówno pyły zawieszone jak i substancje będące markerami zanieczyszczenia powietrza: formaldehyd, wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (benzo(a)piren, naftalen) oraz inne związki lotne (rozpuszczalniki organiczne) w szerokim zakresie stężeń. Próbkę są pozyskiwane bezpośrednio z nacieków źródeł emisji oraz ze stref zagrożenia zanieczyszczeniami, ze szczególnym uwzględnieniem pionowego profilowania jakości powietrza oraz z uwzględnieniem zależności między emisją zanieczyszczeń a warunkami atmosferycznymi oraz porami dnia i roku.

Ogólny schemat systemu pomiarowego wykorzystującego dron ilustruje rys. 1.



Rys. 1. Ilustracja systemu pomiarowego sprężonego z dronem

W prezentowanej aparaturze przepływ powietrza jest wymuszony przez mikropompę próżniową firmy Thomas o wydajności do 650 ml/min zasilaną napięciem 3 V. Przepływ jest regulowany dodatkowo przez teflonowy zawór igłowy oraz czujnik przepływu (D6F-P firmy Omron). Sterowanie tym systemem odbywa się za pośrednictwem mikrokontrolera umieszczonego w stacji pomiarowej. Wyłączenie pompy następuje po pobraniu określonej ilości powietrza zmierzonej na podstawie danych z czujnika przepływu. Cała aparatura jest zasilana z baterii drona.

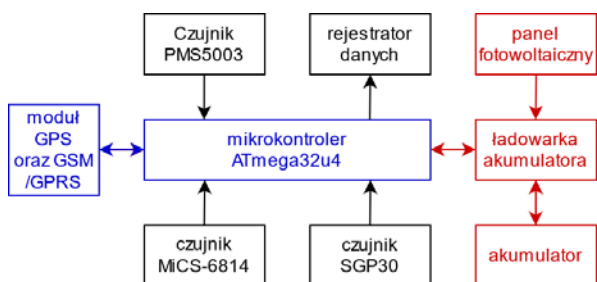
Próbki są pobierane do rurki sorpcyjnej wypełnionej odpowiednim sorbentem (Tenax TA oraz Carbograph 5TD). Wlot powietrza, w razie potrzeby, może być zabezpieczany filtrem chroniącym przed przedostawianiem się do wnętrza cząstek stałych. Odpowiednio zabezpieczone próbki są transportowane do laboratorium stacjonarnego i dalej analizowane np. chromatograficznie.

## 5. Stacje pomiarowe

Budowane stacje pomiarowe działają niezależnie od zewnętrznych źródeł zasilania i bez konieczności ich bieżącej obsługi. Dzięki temu liczba miejsc, w których są umieszczone, jest nieograniczona. Ważne jest, aby dane pomiarowe były przesyłane na bieżąco do centralnego serwera, bez konieczności ich bezpośredniego pobierania ze stacji.

W przypadku stacji, które będą przystosowane do przenoszenia przez dron, istotną jest ich niewielka masa przy zachowaniu szczelności konstrukcji i odporności na warunki atmosferyczne. Ogólny schemat ideowy wyposażenia takiej stacji przedstawia rys. 2.

Wszystkie stacje pomiarowe są wyposażone w wielofunkcyjne czujniki czystości powietrza. Umożliwiają one pomiary wielu parametrów stanu atmosfery. Cechuje je mała masa i niewielki pobór prądu. Analogiczne czujniki znajdują się również na wyposażeniu stacji pomiarowej zamontowanej na dronie, razem z zestawem do poboru próbek powietrza.



Rys. 2. Schemat ideowy autonomicznej stacji pomiarowej

„Sercem” stacji pomiarowej jest mikrokontroler ATMEGA32u4 zamontowany na płytce Arduino Leonardo, zintegrowanej z układem SIM800, produkcji DFRobot [22]. Taką płytkę cechują niewielkie wymiary i niewielki pobór prądu. Mikrokontroler jest łatwy do oprogramowania ze względu na dużą dostępność gotowych bibliotek dla programistów, w tym bibliotek obsługujących ww. czujniki i opisany przez moduł komunikacyjny SIM800. Pomimo małej ilości dostępnej pamięci (2,5 kB SRAM i 32 kB Flash) wystarczy on do obsługi wszystkich modułów.

Moduł SIM808 odpowiada za bieżące przesyłanie rejestrowanych danych pomiarowych do serwera. Wymaga on zainstalowania karty SIM stosowanej w telefonach komórkowych. Dzięki obsłudze pakietowej transmisji danych komórkowych GPRS (ang. General Packet Radio Service) wysyła on dane pomiarowe bezpośrednio łącząc się z serwerem przez protokół HTTP. Jego dodatkową zaletą jest wyposażenie w układ obsługujący system nawigacji satelitarnej GPS (ang. Global Positioning System). Dlatego wśród danych pomiarowych jest przesyłana również dokładna lokalizacja stacji pomiarowej (o ile będzie się znajdować na otwartej przestrzeni – poza budynkami) i czas pomiaru (także przekazywany przez system GPS). Dzięki temu nie jest konieczne stosowanie dodatkowego zegara.

Na wypadek utraty połączenia z serwerem stacje na bieżąco rejestrują dane pomiarowe. Wykorzystywane są do tego standardowe karty pamięci SD, stosowane m.in. w aparatach fotograficznych. Złącze do tych kart jest zabudowane w stacji i podłączone do mikrokontrolera.

Zasilanie standardowej stacji stanowi panel fotowoltaiczny umieszczony na jej grzbiecie i podłączony do ładowarki ogniwi Li-ion 18650 lub LiPol o napięciu 3,7 V. Zamontowane ogniwo zapewnia zasilanie urządzenia, gdy panel nie dostarcza prądu. Właściwy wybór panelu i układu ładowania ogniwa wymaga zmierzenia poboru prądu danej wersji całej stacji pomiarowej. Zakładamy, że stacje, zależnie od ich przewidywanych lokalizacji i konieczności (lub braku takiej konieczności) transportu z użyciem drona, będą wyposażane w różne rodzaje zasilania. W ten sposób będą minimalizowane zarówno koszty jak i masa stacji.

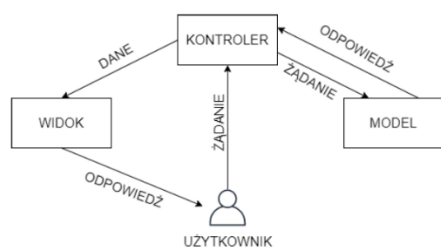
## 6. Metody gromadzenia i analizy uzyskanych wyników

Dane pomiarowe są wysyłane do serwera WWW za pomocą zapytań metodą POST na konkretny adres internetowej. W zapytaniu przekazywane dane odpowiadają strukturze zdefiniowanej w oprogramowaniu serwera. Serwer odpowiada za ich dalszą interpretację oraz wysłanie informacji zwrotnej do klienta (wysyłającego dane) w postaci kodu HTTP. Serwer po otrzymaniu danych w opisany sposób, dokonuje ich zapisu w postaci rekordów, czyli kolejnych wierszy tablicy w relacyjnej bazie danych MySQL [23].

W celu wyświetlenia mapy z naniesionymi obszarami zanieczyszczeń, użytkownik będzie mógł wejść na inny, konkretny adres internetowej, co spowoduje wysłanie zapytania do serwera metodą GET. Serwer pobierze odpowiednie rekordy zapisane w bazie danych (np. tylko te z ostatniej doby), naniesie je na mapę oraz wyśle zawartość kompletnej strony internetowej, która zostanie wyświetlona przez przeglądarkę internetową. Ponadto planowane jest rozszerzenie funkcjonalności serwera o generowanie dodatkowych wizualizacji danych przy wykorzystaniu biblioteki języka JavaScript – *D3.js* [24], dodanie obsługi dla języka Python oraz wykorzystanie biblioteki do wizualizacji danych – *Matplotlib* [25]. Planowana jest również późniejsza integracja z aktualnie działającymi agregatorami danych pomiarowych, takimi jak Airly [14]. To pozwoli na zebranie w jednym miejscu jak największej liczby danych pomiarowych, a następnie przeprowadzenie na ich podstawie procesów nauki sztucznej sieci neuronowej. Taka sieć będzie zdolna

do przewidywania stężeń zanieczyszczenia powietrza docelowo nawet na dużych obszarach przy znajomości wyników pomiarowych jedynie na obszarach znacznie mniejszych.

Schemat rozwiązania stosujący wzorzec architektoniczny „Model-Widok-Kontroler” przedstawia rys. 3, gdzie funkcję Kontrolera pełni serwer WWW, „Model” to baza danych MySQL, a „Widok” jest stroną internetową przekazywaną użytkownikowi.



Rys. 3. Schemat ideowy działania aplikacji internetowej

## 7. Podsumowanie

W pracy zaproponowano system do automatycznego zbierania i analizy danych o wybranych zanieczyszczeniach powietrza. Bazuje on na czujnikach elektrochemicznych wykorzystujących m.in. zasadę rozpraszania światła na cząsteczkach zawieszonych w powietrzu. Dzięki dodatkowemu poborowi próbek powietrza oraz dzięki ich dalszym, precyzyjnym analizom w laboratorium stacjonarnym, możliwa jest poprawa dokładności wyników mierzonych bezpośrednio za pomocą mało precyzyjnych czujników.

Bezzałogowe statki powietrzne oraz pojazdy komunikacji miejskiej, ze względu na swoją mobilność, mogą być wykorzystywane zarówno do badań na większych obszarach, jak i do analizy punktowych źródeł emisji zanieczyszczeń. W przypadku zastosowania dronów należy podkreślić ich stosunkowo mały koszt i łatwość użycia.

Wykorzystanie serwera WWW w celu ciągłego gromadzenia oraz analizowania danych pomiarowych pozwala uzyskać dostęp do danych w dowolnym miejscu za pomocą sieci internetowej. Implementacja dalszych sposobów reprezentacji gromadzonych danych ogranicza się do opracowania dodatkowej podstrony internetowej i nie wymaga istotnych zmian w oprogramowaniu serwera. To czyni proponowany system elastycznym i uniwersalnym.

Obecnie trwają prace związane z przygotowaniem drona do przeprowadzania pomiarów, konstruowane są prototypowe stacje pomiarowe, a serwer jest dostosowywany do gromadzenia danych z wielu stacji pomiarowych.

*Badania sfinansowane częściowo z subwencji badawczej oraz ze środków projektu Inkubator Innowacyjności 4.0.*

**Autorzy:** dr inż. Adam Konieczka, Politechnika Poznańska, Instytut Automatyki i Robotyki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: [adam.konieczka@put.poznan.pl](mailto:adam.konieczka@put.poznan.pl);

mgr inż. Michał Adamski, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Wydział Chemii, ul. Uniwersytetu Poznańskiego 8, 61-614 Poznań, E-mail: [mchal.adamski@amu.edu.pl](mailto:mchal.adamski@amu.edu.pl);

prof. dr hab. inż. Adam Dąbrowski, Politechnika Poznańska, Instytut Automatyki i Robotyki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: [adam.dabrowski@put.poznan.pl](mailto:adam.dabrowski@put.poznan.pl);

prof. UAM dr hab. inż. Agata Dąbrowska, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Wydział Chemii, ul. Uniwersytetu Poznańskiego 8, 61-614 Poznań, E-mail: [agatadab@amu.edu.pl](mailto:agatadab@amu.edu.pl);

inż. Tomasz Jankowski, Politechnika Poznańska, Instytut Automatyki i Robotyki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: [tomasz.ad.jankowski@student.put.poznan.pl](mailto:tomasz.ad.jankowski@student.put.poznan.pl).

## LITERATURA

- [1] Jędrak J. i in., Wpływ zanieczyszczeń powietrza na zdrowie, *Krakowski Alarm Smogowy*, 2017
- [2] Lave L.B., Seskin E.P., Air pollution and human health, Routledge, 2013
- [3] Urbaniak W., Problems of monitoring air pollution, *Polish Association of Sanitary Engineers and Technicians*, Poznań 2017
- [4] Kleczkowski P., Smog in Poland, causes, effects, prevention, PWN, Warszawa 2020
- [5] Mazur M., Air protection systems, Scientific and Didactic Publishing House, AGH im. S. Staszica, Kraków, 2004
- [6] United States Environmental Protection Agency [<https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics>]
- [7] Adamski M., Urbaniak W., Dąbrowska A., Dąbrowski A., Unmanned aircraft testing for monitoring of pollution in the environment, *Electrical Review*, Vol. 94, No. 9, 2018, 14–17
- [8] Kuchcik, M., Milewski, P., Zanieczyszczenie powietrza w Polsce – stan, przyczyny i skutki. *Studia KPZK*, 2018
- [9] Powiatowa Stacja Sanitarno-Epidemiologiczna w Krakowie, Kilka prawd o smogu, [[https://pssekrakow.pl/index.php?option=com\\_content&view=article&id=623:kilka-prawd-o-smogu&catid=125&Itemid=238](https://pssekrakow.pl/index.php?option=com_content&view=article&id=623:kilka-prawd-o-smogu&catid=125&Itemid=238)]
- [10] Polski Alarm Smogowy, Kryzys w wymianie węglowych pieców – raport Polskiego Alarmu Smogowego, 2020 [[https://www.polskialarmsmogowy.pl/polski-alarm-smogowy/aktualnosci/szczegoly\\_kryzys-w-wymianie-weglowych-piecow--raport-polskiego-alarmu-smogowego,1632.html](https://www.polskialarmsmogowy.pl/polski-alarm-smogowy/aktualnosci/szczegoly_kryzys-w-wymianie-weglowych-piecow--raport-polskiego-alarmu-smogowego,1632.html)]
- [11] smogLAB, Powietrze w Krakowie mimo wszystko czystsze. Duży smog dwa razy rzadziej niż w 2018 roku, 2021 [<https://smoglab.pl/smog-w-krakowie-coraz-mniejszy/>]
- [12] Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, Stan Środowiska w Polsce. Raport 2018, Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa, 2018 [[https://www.gios.gov.pl/images/dokumenty/pms/raporty/Stan\\_srodowiska\\_w\\_Polsce-Raport\\_2018.pdf](https://www.gios.gov.pl/images/dokumenty/pms/raporty/Stan_srodowiska_w_Polsce-Raport_2018.pdf)]
- [13] Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, Monitoring jakości powietrza w miastach w odniesieniu do zanieczyszczeń emitowanych przez samochody, 2019 [<https://www.nik.gov.pl/plik/id,19075,vp,21678.pdf>]
- [14] airy [<https://airy.org/pl>]
- [15] Obywatelska sieć czujników PM2,5 i PM10 [<http://luftdaten.org/pl>]
- [16] McKinney i in., A sampler for atmospheric volatile organic compounds by copter unmanned aerial vehicles, *Atmospheric Measurement Techniques*, Vol. 12, 2019, 3123–3135
- [17] Villa T.F., Gonzalez F. i in., Development and Validation of a UAV Based System for Air Pollution Measurements, *Sensors* 2016, 16, 1072, doi:10.3390/s16071072
- [18] Dokumentacja protokołu komunikacyjnego HTTP [<https://developer.mozilla.org/pl/docs/Web/HTTP>]
- [19] Google Maps JavaScript API V3 Reference [<https://developers.google.com/maps/documentation/javascript/reference>]
- [20] DFRobot, Air Quality Monitor (PM 2.5, Formaldehyde, Temperature & Humidity Sensor) [<https://www.dfrobot.com/product-1612.html>]
- [21] DFRobot, Digital universal particle concentration sensor. PMS5003ST series data manual [[https://raw.githubusercontent.com/ArduinoLibrary/DFRobot\\_SEN0233\\_Air\\_Quality\\_Monitor/master/PMS5003ST%20series%20data%20manua\\_English\\_V2.6%20.pdf](https://raw.githubusercontent.com/ArduinoLibrary/DFRobot_SEN0233_Air_Quality_Monitor/master/PMS5003ST%20series%20data%20manua_English_V2.6%20.pdf)]
- [22] DFRobot, DFR0355 SIM808 with Leonardo mainboard [[https://wiki.dfrobot.com/SIM808\\_with\\_Leonardo\\_mainboard\\_SKU\\_DF\\_R0355](https://wiki.dfrobot.com/SIM808_with_Leonardo_mainboard_SKU_DF_R0355)]
- [23] Relacyjne bazy danych – podstawy [<https://www.sqlpedia.pl/relacyjne-bazy-danych-pojecia-podstawowe/>]
- [24] Strona internetowa biblioteki D3.js [<https://d3js.org/>]
- [25] Strona internetowa biblioteki Matplotlib [<https://matplotlib.org/>]