

## Badanie jakości powietrza z wykorzystaniem czujników elektrochemicznych i technik chromatograficznych

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono urządzenie do poboru próbek powietrza atmosferycznego na złoża sorpcyjne i jednoczesnego analizowania jego parametrów z wykorzystaniem niskokosztowych czujników elektrochemicznych. Urządzenie wykonano w formie przystawki montowanej do bezałogowego statku powietrznego (drona), w związku z czym możliwy pobór próbek z miejsc trudno dostępnych. Opisano także laboratoryjną metodę chromatograficzną, która została wykorzystana do analizy składu chemicznego pobranych próbek.

**Abstract.** This article presents equipment for taking samples of atmospheric air on sorption beds and then simultaneously analyzing parameters using low-cost electrochemical sensors. The device was made in a form of a module mounted to an unmanned aerial vehicle (drone), therefore it is possible to take samples from hard-to-reach locations. A laboratory chromatographic method is also described. It was used to analyze the chemical composition of the collected samples. (**Air quality testing using electrochemical sensors and chromatographic techniques**).

**Słowa kluczowe:** badanie jakości powietrza, czujniki elektrochemiczne, techniki chromatograficzne, bezałogowe statki powietrzne.

**Keywords:** aerial sampling, electrochemical sensors, chromatographic techniques, unmanned aerial vehicles.

### 1. Wstęp

Emisja toksycznych związków chemicznych do atmosfery i zagrożenia z nią związane stały się jednymi z największych wyzwań ludzkości w XXI wieku. Zanieczyszczenie powietrza ma bezpośredni, zdecydowanie negatywny wpływ na nasze zdrowie oraz sposób funkcjonowania [1–3]. Coraz częstsze ostrzeżenia o występującym na danym obszarze smogu ograniczają aktywność i przebywanie na świeżym powietrzu [4]. Istotny jest zatem ciągły i precyzyjny monitoring jakości powietrza w wielu miejscach, gdyż zanieczyszczenia powietrza mają często charakter bardzo lokalny. Monitoring stanowi pierwszą linię obrony w walce o czyste powietrze i narzędzie do minimalizacji negatywnych skutków skażenia atmosfery oraz wywierania wpływu na decydentów do podejmowania działań ograniczających emisję szkodliwych substancji.

W atmosferze znajduje się zbyt wiele różnych zanieczyszczeń, aby wszystkie mogły być monitorowane. Tak postępuje się z wybranymi, które są charakterystyczne dla danego źródła zanieczyszczeń (zakładów przemysłowych, pojazdów mechanicznych), ponieważ wiadomo lub podejrzewa się, że powodują szkodliwe skutki dla środowiska i/lub zdrowia. Przykładowo, mogą mieć działanie rakotwórcze. Te zanieczyszczenia nazywane są wskaźnikami zanieczyszczenia powietrza [5]. Do głównych wskaźników monitorowanych w Europie należą: dwutlenek siarki (SO<sub>2</sub>), tlenki azotu (NO<sub>x</sub>), pył zawieszony (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>), ozon (O<sub>3</sub>), tlenek węgla (CO), lotne związki organiczne (VOC), benzopiren oraz kilka toksycznych metali, takich jak ołów, arsen, kadm, nikiel i rtęć [6].

Pył zawieszony jest mieszaniną cząstek stałych i kropelek cieczy zarówno związków organicznych jak i nieorganicznych, które utrzymują się w powietrzu. W zależności od średnicy cząstek może on przenikać do górnych dróg oddechowych a nawet bezpośrednio do krwioobiegu. Pył PM<sub>10</sub> zawiera cząstki o średnicy mniejszej niż 10 μm, natomiast pył drobny PM<sub>2.5</sub> – cząstki o średnicy mniejszej niż 2,5 μm. Norma stężeń pyłu zawieszonego zalecana przez Światową Organizację Zdrowia (WHO) w przypadku pyłu PM<sub>10</sub> dla stężenia średniodobowego wynosi 50 μg/m<sup>3</sup>, dla stężenia średniorocznego 40 μg/m<sup>3</sup>. W przypadku pyłu PM<sub>2.5</sub> dopuszczalny poziom dla stężenia średniorocznego wynosi 20 μg/m<sup>3</sup> [7]. Niestety corocznie, szczególnie w trakcie trwania sezonu grzewczego, normy te

są niejednokrotnie przekraczane, w skrajnych przypadkach nawet o kilkaset procent.

Metody detekcji szkodliwych związków chemicznych w powietrzu można podzielić na 2 grupy: opierające się o analizy chemiczne pobranych próbek powietrza oraz pomiary wykonywane na bieżąco z użyciem czujników zamontowanych w stacjach pomiarowych. W przypadku drugiej grupy wyróżnia się wysoce wyspecjalizowane, precyzyjne

i bardzo kosztowne urządzenia pomiarowe (znajdujące się np. w gestii Wojewódzkich Inspektoratów Ochrony Środowiska) oraz stacje pomiarowe wykorzystujące łatwo dostępne, niskokosztowe, ale mało precyzyjne czujniki elektrochemiczne (np. w systemach monitoringu jakości powietrza Airly lub Sensor Community) [8, 9]. Istotnym ograniczeniem prowadzenia precyzyjnych pomiarów jest ich koszt oraz niewielka dostępność takich urządzeń, zwłaszcza

w wersjach mobilnych. Z tego względu dokładne dane pomiarowe pokrywają jedynie niewielki, wybrany fragment obszaru, najczęściej aglomeracji miejskiej. Z kolei wszechstronnie dostępne, niedrogie rozwiązania charakteryzują się niskim stopniem precyzji, który nie jest w trakcie eksploatacji w żaden sposób weryfikowany. Z tego względu uzyskiwane wyniki służą jedynie do orientacyjnego określenia zagrożenia zanieczyszczeniem powietrza jedynie wybranymi, szkodliwymi związkami chemicznymi.

W [10–13] przedstawiono urządzenia pomiarowe sprzężone z dronami, które umożliwiają pobór próbek powietrza na rurki sorpcyjne z przeznaczeniem do dalszej analizy w laboratorium stacjonarnym. Dodatkowo w [12] ukazano możliwość zastosowania drona jako nośnika dla nowych pasywnych i aktywnych zminiaturyzowanych systemów pobierania próbek powietrza, w tym do mikroekstrakcji w fazie stałej (SPME Arrow) i ekstrakcji w probówce (ITEX). Z kolei w [14] zaproponowano system pomiarowy sprzężony z dronem, który wykonuje jedynie pomiary z użyciem niskokosztowych czujników elektrochemicznych i zapisuje je na wbudowanej karcie pamięci. Podobny system, tyle że przekazujący dane z wykorzystaniem łączności bezprzewodowej opisano w [15]. Wykorzystanie floty dronów wyposażonych w czujniki czystości powietrza proponuje się w [16], zaś sieci stacji pomiarowych stacjonarnych i przenoszonych przez drony – w [17].

Bardzo istotną kwestią jest miejsce umieszczenia czujników pod dronem tak, aby ruch śmigieł nie zakłócał uzyskiwanych wyników. Ten problem rozważono w pracy Villa T. F. i wsp. [18].

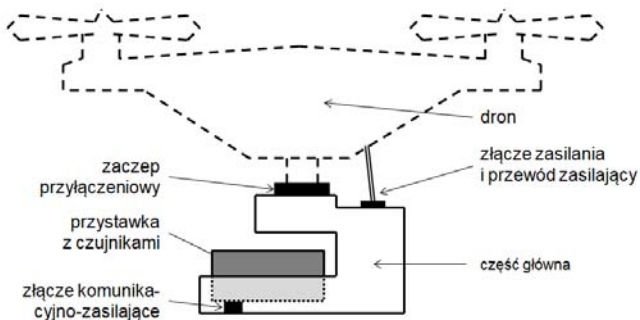
Praca Alabdullah A. J. i wsp. [19] przedstawia projekt systemu, który ma na celu powiadomianie mieszkańców o poziomie stężenia lotnych związków organicznych zarówno w środowisku wewnętrznym jak i zewnętrznym na podstawie odczytów z czujników elektrochemicznych realizujących pomiary w czasie rzeczywistym.

Zaproponowane tutaj urządzenie umożliwia jednocześnie pobór próbek powietrza na złoża sorpcyjne celem wykonania późniejszych precyzyjnych analiz laboratoryjnych. Jednocześnie analizuje ono jakość powietrza z użyciem zestawu popularnych niskokosztowych czujników elektrochemicznych, a zapisywane na bieżąco wyniki mogą być porównane z uzyskanymi wynikami analiz laboratoryjnych. Aby umożliwić pobór próbek powietrza z miejsc trudnodostępnych, zostało wykonane jako przystawka montowana do niewielkiego, bezałogowego statku powietrznego (drona).

Dalsza część artykułu jest zorganizowana następująco. W rozdziale 2. przedstawiono zbudowane urządzenie do poboru próbek powietrza, a w kolejnym – metodę analityczną dla pobranych próbek. Rozdział 4. opisuje wyniki wstępnych testów proponowanego rozwiązania. Krótkie podsumowanie zawarto w rozdziale 5.

## 2. Urządzenie do poboru próbek powietrza

Proponowane urządzenie przewidziano do łączenia z dronem Yuneec H520E o maksymalnym czasie lotu dochodzącym do 30 minut i umożliwiającym przenoszenie ładunków o masie do 518g [20]. Urządzenie składa się z dwóch części – głównej, która jest montowana bezpośrednio do drona za pomocą uniwersalnej szybkozłączki, oraz przystawki z zestawem czujników łączonej z częścią główną. Zasilanie urządzenia odbywa się z baterii drona za pośrednictwem dodatkowo wyprowadzonego przewodu zasilającego (rys. 1).



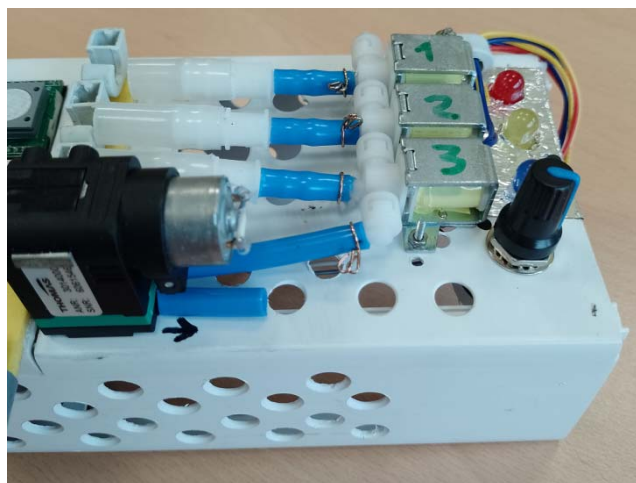
Rys. 1. Koncepcja urządzenia pomiarowego

Na spodzie części głównej znajdują się uchwyty do zamocowania trzech złożów sorpcyjnych, które mają postać rurek. Przed wykonaniem lotu złoża łączy się za pomocą wężyków z wejściami elektro-pneumatycznego zaworu trójdrożnego. Wyjście zaworu jest połączone z wejściem mikropompy próżniowej, która wymusza przepływ powietrza przez wybrane złożo. Obok pompy znajduje się pokrętło regulacyjne, którym można wybrać jeden z sześciu trybów pracy urządzenia (różne wysokości i czasy pomiarów próbek powietrza). Dalej umieszczono trzy duże diody LED, podklejone aluminiową folią odbłaskową w celu zwiększenia ich widoczności z dużej odległości. Pierwsza z nich (czerwona) informuje o wykonywaniu pomiaru, zaś dwie pozostałe (żółta i niebieska) informują operatora drona o

osiągnięciu zadanej wysokości koniecznej do wykonania pomiaru i pomagają mu ją utrzymać (rys. 2).

Przystawka z czujnikami jest osobnym modulem wpinanym w część główną przy pomocy złącza komunikacyjno-zasilającego. Znajdują się w niej:

- 1) mikrokontroler sterujący pracą całego urządzenia (w tym układami części głównej),
- 2) moduł SIM800 zawierający odbiornik systemu GPS (ang. Global Positioning System), którego odczyty są dołączane do zbieranych danych pomiarowych,
- 3) czujnik wysokości BMP280, dzięki któremu operator drona otrzymuje informacje o osiągnięciu zadanej wysokości; informacja o bieżącej wysokości także jest dodawana do danych pomiarowych,
- 4) złącze karty pamięci SD, na którą są zapisywane wyniki pomiarów wraz z informacją o poborze powietrza na wybrane złożo sorpcyjne,
- 5) zestaw czujników elektrochemicznych: PMS5003 (mierzy stężenia pyłów PM1, PM2.5, PM10, formaldehydu oraz temperaturę i wilgotność względną powietrza), Figaro TGS2611 (mierzy stężenie metanu), MQ6 (mierzy stężenie LPG i izobutanu), MQ7 (mierzy stężenie tlenku węgla), MQ135 (mierzy stężenie alkoholu, benzenu i amoniaku).



Rys. 2. Spód części głównej urządzenia

Urządzenie po włączeniu odczytuje ustawienie pokrętła regulacyjnego, którym wybiera się jeden z sześciu trybów (uprzednio zaprogramowanych wysokości i czasów) poboru próbek na złożo. Potem oczekuje ono na uzyskanie sygnału GPS. Następnie daje sygnał o swojej gotowości i rozpoczyna rejestrację danych z czujników elektrochemicznych uzupełnionych informacjami z modułu GPS. Po osiągnięciu pierwszej z zapisanych wysokości automatycznie jest uruchamiana mikropompa pompująca powietrze przez pierwsze złożo sorpcyjne. Po zadanych czasie poboru próbki jest wyłączana. Diody informują o tym operatora drona nakazując mu wzlecenie na kolejną wysokość, na której ma być wykonany drugi pobór próbki. Ten proces jest powtarzany dla wszystkich trzech złożów. Po zakończeniu poboru powietrza na 3. złożo diody wyświetlają informację o zakończeniu pomiarów. Urządzenie pomiarowe podczas lotów testowych przedstawiono na rys. 3.

Dzięki temu, że przystawka z czujnikami jest autonomicznym modulem, może być później wykorzystywana do wykonywania niezależnych pomiarów bez użycia drona. Znajdujący się w niej moduł SIM800 umożliwia wówczas wysyłanie danych pomiarowych z czujników elektrochemicznych na bieżąco wykorzystując sieć telefonii komórkowej i pakietową transmisję danych.



Rys. 3. Dron Yuneec H520E podczas lotu testowego z podłączonym urządzeniem pomiarowym

### 3. Metoda analityczna dla pobranych próbek

W celu wykonania poboru próbek, przed wykonaniem lotu, są ustalane wysokości i czas aspiracji powietrza przez urządzenie. Czas poboru próbek (pracy pompy próżniowej) przekłada się bowiem bezpośrednio na określoną objętość analizowanej próbki i jest ustalany na podstawie przewidywanej koncentracji oznaczanych szkodliwych związków chemicznych (im mniejsza koncentracja, tym większa objętość powietrza musi zostać przepuszczona przez złożo sorpcyjne). Do absorpcji oznaczanych analitów (związków chemicznych) wykorzystywane są rurki sorpcyjne zabezpieczone spiekami szklanymi, chroniącymi przed kontaminacją. Rurki sorpcyjne (firmy SKC) wypełnione są złożem dobranym pod kątem oznaczanego związku lub grupy związków chemicznych oraz metody ich oznaczania (GC lub HPLC). Najczęściej stosowane złoża to: żel krzemionkowy, węgiel aktywny, Anasorb, Tenax, XAD, Chromosorb i Porapak. Stosowane są również próbki z żelazem krzemionkowym poddany obróbce, np. 2,4-dinitrofenylohydrazyną do pobierania próbek aldehydów.

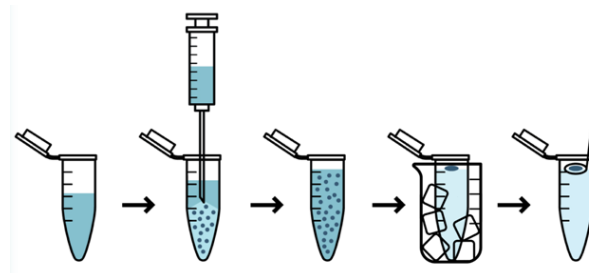
Równoległe do pobierania próbek pobierane są próby ślepe w celu zbadania artefaktów związanych z pobieraniem próbek, takich jak np. pasywna dyfuzja lotnych związków organicznych (LZO) do rurki.

Po zaabsorbowaniu określonej objętości powietrza na złożo rurki są demontowane, zabezpieczane szczelnymi zatyczkami z tworzywa sztucznego, opisywane i w możliwie krótkim czasie transportowane do laboratorium stacjonarnego.

W laboratorium stacjonarnym próbki przygotowywane są do analizy na podstawie czasu pozyskania oraz lokalizacji. W pierwszej kolejności przeprowadzana jest desorpcja analitów ze złoża najczęściej z użyciem rozpuszczalników organicznych

Po wstępnym wyekstrahowaniu związków ze złoża, część z nich zostaje poddana bezpośredniej analizie chromatograficznej w celu określenia stężenia w próbce. W przypadku większych koncentracji stosowane jest dodatkowe rozcieńczenie próbki. W przypadku analizy niektórych związków (szczególnie aldehydów, które są związkami polarnymi, lotnymi, łatwo rozpuszczalnymi w wodzie) występujących na niskim poziomie stężenia, wymagane jest zastosowanie specjalnego etapu przygotowania próbki w celu przeprowadzenia ich w formy bardziej stabilne. Dlatego stosowana jest metoda związana ze wstępną derywatyzacją odczynnikiem PFBOA (O-(2,3,4,5,-pentafluorobenzyl) hydroksylamina). Technika ta, polegająca na zamianie podstawników chemicznych, pozwala uzyskać formy stabilne analizowanych związków [21].

W niektórych przypadkach, w celu wyizolowania analitów na niskich poziomach koncentracji, stosowana jest technika dyspersyjnej mikroekstrakcji ciecz-ciecz (dispersive liquid-liquid microextraction, DLLME) [22]. Metoda ta została zmodyfikowana z wykorzystaniem procesu zamrożenia odpowiednio dobranego pod względem polarności, gęstości i temperatury topnienia ekstrahenta (tzw. proces zamrożenia pływającej kropli organicznej – ang. dispersive liquid-liquid microextraction based on solidification of floating organic droplet DLLME-SFO) [23] (rys. 4). Metoda ta pozwala osiągać wysoką czułość przy pobraniu niewielkiej ilości próbki (kilka mililitrów) i ograniczyć zużycie rozpuszczalników oraz odczynnika derywatyzującego do poziomu mikrolitrów.



Rys. 4. Schematyczny diagram analizy z wykorzystaniem techniki DLLME-SFO

Badane związki rozdzielano i identyfikowano w układzie chromatograf gazowy – detektor wychwytu elektronów (GC/ECD) oraz chromatograf gazowy – spektrometr mas (GC/MS).

### 4. Wstępne testy opracowanego rozwiązania

W ramach testów opracowanego urządzenia przeprowadzono próbne loty pozwalające oszacować realny czas lotu drona z podłączonym urządzeniem. Zależnie od warunków pogodowych wynosił on przeszło 20 minut, co umożliwiło pobranie próbek powietrza na trzech różnych wysokościach. Tym samym potwierdzono, że stosowanie większej liczby złożo sorpcyjnych w czasie pojedynczego lotu nie jest celowe ze względu na kilkuminutowy czas potrzebny na pobranie pojedynczej próbki.

Stwierdzono także, że zastosowanie czujnika ciśnienia powietrza BMP280 do pomiaru wysokości pozwala uzyskać dokładniejsze pomiary niż dostarczane przez moduł GPS. Czujnik wymaga jednak zaizolowania go przed podmuchami wiatru, także tymi wytwarzanymi przez śmigła drona.

W przypadku analiz laboratoryjnych istotnym wyzwaniem okazało się szerokie spektrum próbek zarówno pod kątem samych analitów jak i ich koncentracji. Stężenie poszczególnych związków chemicznych w powietrzu jest bardzo zróżnicowane i zmienia się w sposób istotny ze względu na lokalizację oraz czas dokonywania pomiaru. W celu opracowania właściwej metody analitycznej wybrano związki będące markerami zanieczyszczeń powietrza i pod ich kątem dobrano zarówno złożo sorpcyjne znajdujące się wewnątrz rurek próbnikowych jak i odpowiednie techniki analityczne na etapie przygotowania próbek do analizy oraz parametry urządzenia wykorzystywanego w trakcie właściwej analizy.

Zebrałe wyniki są na bieżąco analizowane oraz przetwarzane w celu dalszego zoptymalizowania metody analitycznej.

## 5. Podsumowanie

W artykule zaprezentowano urządzenie montowane do drona, które służy do automatycznego poboru próbek powietrza atmosferycznego z różnych wysokości. W trakcie jednego lotu jest możliwe pobranie trzech niezależnych próbek na złoża sorpcyjne, które zostaną następnie przebadane w stacjonarnym laboratorium z wykorzystaniem technik chromatograficznych. Równocześnie parametry pobieranego powietrza są mierzone z wykorzystaniem tanich czujników elektrochemicznych, dzięki czemu docelowo będzie możliwe porównanie ich dokładności w różnych warunkach pomiarowych.

Dostarczone do laboratorium próbki analizowane są z wykorzystaniem technik chromatograficznych: chromatografii gazowej sprzężonej z detekcją mas, detektorem wychwytu elektronów (ECD) oraz detektorem płomieniowo-jonizacyjnym (FID) oraz wysokosprawnym chromatografem cieczowym HPLC (DAD). W celu przeprowadzenia analizy opracowano walidowaną metodę analityczną, gwarantującą wysoki poziom wiarygodności otrzymanyh wyników.

W ramach dalszych prac autorzy planują analizy porównawcze wskazań czujników elektrochemicznych z wynikami laboratoryjnymi uzyskanymi dzięki opracowanej metodzie analitycznej, bazującej na analizach chromatograficznych.

*Badania sfinansowano z subwencji badawczej 0211/SBAD/0223.*

**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).

## LITERATURA

- [1] Jędrak J. et al., Wpływ zanieczyszczeń powietrza na zdrowie, Krakowski Alarm Smogowy, 2017.
- [2] Lave L.B., Seskin E.P., Air pollution and human health, Routledge, 2013.
- [3] Kuchcik M., Milewski P., Zanieczyszczenie powietrza w Polsce – stan, przyczyny i skutki. *Studia KPZK*, 2018/182/2, 341-364.
- [4] Kleczkowski P., Smog w Polsce. Przyczyny, skutki, przeciwdziałanie, PWN, Warszawa 2020.
- [5] Urbaniak W., Problems of monitoring air pollution, Polish Association of Sanitary Engineers and Technicians, Poznań 2017.
- [6] Mazur M., Systemy ochrony powietrza, Uczelniane Wydaw. Nauk.-Dydakt. AGH im. S. Staszica, Kraków, 2004.
- [7] United States Environmental Protection Agency, Particulate Matter (PM) Pollution, <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics> (dostęp 22.03.2023).
- [8] Airly, <https://airly.org/pl> (dostęp 22.03.2023).
- [9] Sensor.Community, <https://sensor.community/pl/> (dostęp 22.03.2023).
- [10] Chen J., Scircle A. et al., On the use of multicopters for sampling and analysis of volatile organic compounds in the air by adsorption/thermal desorption GC-MS, *Air Quality, Atmosphere & Health*, 11, 835-842. <https://doi.org/10.1007/s11869-018-0588-y>.
- [11] Black O., Chen J. et al., Adaption and use of a quadcopter for targeted sampling of gaseous mercury in the atmosphere, *Environ Sci Pollut Res*, 25, 13195-13202 (2018). <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1775-y>.
- [12] Ruiz-Jimenez J., Zanca N. et al., Aerial drone as a carrier for miniaturized air sampling systems, *Journal of Chromatography A*, Vol. 1597, 2019, 202-208, ISSN 0021-9673. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2019.04.009>.
- [13] Chang C.-C., Wang J.-L. et al., Development of a multicopter-carried whole air sampling apparatus and its applications in environmental studies, *Chemosphere*, Vol. 144, 2016, 484-492, ISSN 0045-6535. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.08.028>.
- [14] Beryozkina S. and Al-Shakhs N., Real-life Application of the Emission Monitoring System by Using a Drone, *2020 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, Madrid, Spain, 2020, 1-6. doi: 10.1109/EEEIC/ICPSEurope49358.2020.9160738.
- [15] Wivou j., Udawatta L. et al., Air quality monitoring for sustainable systems via drone based technology, *2016 IEEE International Conference on Information and Automation for Sustainability (ICIAFS)*, Galle, Sri Lanka, 2016, 1-5. doi: 10.1109/ICIAFS.2016.7946542.
- [16] Alvear Ó., Zema N.R. et al., Using UAV-Based Systems to Monitor Air Pollution in Areas with Poor Accessibility, *Journal of Advanced Transportation*, 2017, 8204353. doi: 10.1155/2017/8204353.
- [17] Konieczka A., Adamski M. et al., Rozproszony system pomiaru zanieczyszczeń powietrza, *Przegląd Elektrotechniczny (Electrotechnical Review)*, No. 01/2022, ISSN 0033-2097, 127-130. doi: 10.15199/48.2022.01.25.
- [18] Villa T.F., Salimi F. et al., Development and Validation of a UAV Based System for Air Pollution Measurements, *Sensors* 2016, 16, 2202. <https://doi.org/10.3390/s16122202>.
- [19] Alabdullah A.J., Farhat B.I. and Chtourou S., Air Quality Arduino Based Monitoring System, *2019 2nd International Conference on Computer Applications & Information Security (ICCAIS)*, Riyadh, Saudi Arabia, 2019, 1-5. doi: 10.1109/ICCAIS.2019.8769529.
- [20] Yuneec Electric Aviation, Heksakopter Yuneec H520E Dron, <https://yuneec.pl/product-pol-12335-Heksakopter-Yuneec-H520E-Dron.html> (dostęp 22.03.2023).
- [21] Bao M., Pantani F. et al., Determination of carbonyl compounds in water by derivatization-solid-phase microextraction and gas chromatographic analysis, *J Chromatogr A*, 1998 Jun 5; 809 (1-2), 75-87. doi: 10.1016/S0021-9673(98)00188-5. PMID: 9677712.
- [22] Rezaee M., Assadi Y. et al., Determination of organic compounds in water using dispersive liquid-liquid microextraction, *J Chromatogr. A*, 2006 May 26; 1116 (1-2): 1-9. doi: 10.1016/j.chroma.2006.03.007. Epub 2006 Mar 30. PMID: 16574135.
- [23] Lili L., Xu H. et al., Analysis of volatile aldehyde biomarkers in human blood by derivatization and dispersive liquid-liquid microextraction based on solidification of floating organic droplet method by high performance liquid chromatography", *J Chromatogr A*, 1217 (2010) 2365-2370.