

## Urządzenie do szybkiego oznaczania formaldehydu uwalnianego z naczyń ekologicznych do żywności

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono zaprojektowane i zbudowane urządzenie elektroniczne do szybkiego oznaczania formaldehydu uwalnianego podczas ogrzewania tzw. naczyń ekologicznych, w szczególności jednorazowych naczyń papierowych. Urządzenie pobiera próbki badanego powietrza w celu dalszej analizy z wykorzystaniem techniki chromatograficznej GC-ECD. Równoległe urządzenie to wykonuje pomiary z wykorzystaniem czujników elektrochemicznych. Zaprezentowano wyniki pomiarów, wskazujące na możliwość stosowania opracowanego urządzenia.

**Abstract.** This paper presents the designed and constructed electronic device for the rapid determination of formaldehyde released during heating, the so-called ecological vessels, especially disposable paper cups. The proposed equipment collects air samples for further analysis using the GC-ECD chromatographic technique. Parallely, the device performs measurements using electrochemical sensors. Results of measurements, indicating a possibility of the use of the constructed device, are presented. (Device for rapid determination of formaldehyde released from ecological vessels into food).

**Słowa kluczowe:** formaldehyd, naczynia ekologiczne, czujniki elektrochemiczne, analiza GC-ECD.

**Keywords:** formaldehyde, ecological vessels, electrochemical sensors, GC-ECD analysis.

### 1. Wstęp

Zmiany klimatyczne, wywołane globalną popularyzacją ropopochodnych tworzyw sztucznych w XX wieku, stały się podstawą do wprowadzenia nowatorskich i ekologicznych rozwiązań w sektorze opakowaniowym. Zgodnie z Ustawą SUP (Single Use Plastics), zwaną również Dyrektywą Plastikową [1], niebiodegradowalne polimery (m.in. politereftalan etylenu (PET), polipropylen (PP) i polietylen (PE)) są wycofywane z rynków konsumenckich. Na ich miejsce wprowadza się materiały alternatywne, których właściwości użytkowe są zbliżone do konwencjonalnych „plastików”, jednak wykazują podatność na biodegradację lub recykling. Dzięki temu spełniają kluczowe założenia funkcjonowania gospodarki o obiegu zamkniętym (ang. closed-loop economy) [2]. Nowe materiały na rynku można sklasyfikować jako materiały pochodzenia roślinnego (np. papier, otręby pszenne, liście palmowe, trzcina cukrowa) oraz jako biotworzywa (polilaktyd, skrobia termoplastyczna, spieniony polipropylen). Obecnie znalazły one powszechne zastosowanie w produkcji jednorazowych naczyń do żywności.

Zgodnie z Rozporządzeniem Nr 10/2011 [3] materiały i wyroby przeznaczone do bezpośredniego kontaktu z żywnością (FCMs, ang. food contact materials) muszą być odpowiednio znakowane (popularny symbol kieliszka i widelca) oraz spełniać ściśle określone wymagania z zakresu bezpieczeństwa. Oznacza to, że FCMs nie mogą uwalniać do żywności związków chemicznych w stężeniach, które mogłyby w niepożądanym sposób wpłynąć na jej właściwości. Przeprowadzone do tej pory badania wyraźnie jednak sugerują, że pomiędzy FCMs i żywnością dochodzi do różnego rodzaju interakcji, m.in. do migracji niepożądanych związków chemicznych [4-6]. Oznacza to, że materiał, z którego jest wykonane naczynie, może mieć realny wpływ na jakość i walory sensoryczne żywności. Duża różnorodność popularnych materiałów może budzić kontrowersje wśród konsumentów, ponieważ poszerza się grupa potencjalnych zanieczyszczeń migrujących do żywności.

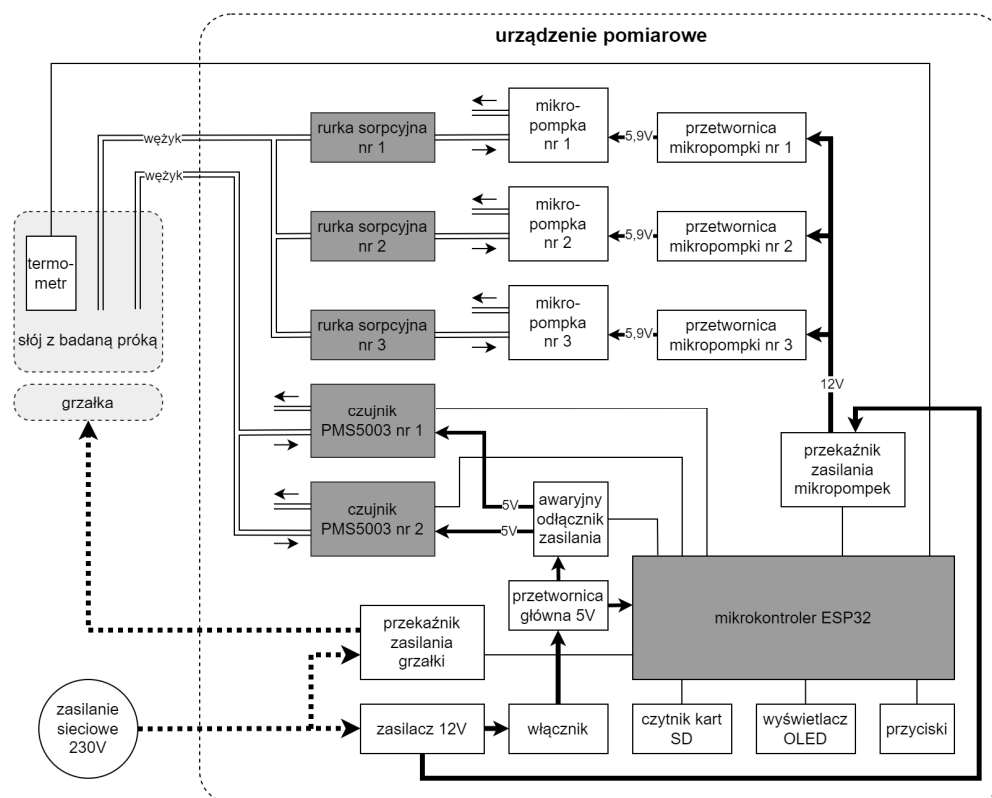
Szczególnie niebezpieczne są migracje związków chemicznych, które mogą być potencjalnie niebezpieczne dla konsumenta (kancerogenne, mutagenne lub alergizujące). Jednym z nich może być niskocząsteczkowy formaldehyd. Zgodnie z Międzynarodową Agencją do Badań nad Rakiem (IARC) został on zaklasyfikowany pod względem toksycz-

ności do grupy 1., co oznacza, że wykazuje właściwości rakotwórcze [7].

Formaldehyd jest związkiem wszechobecnym w środowisku, stanowi jeden z produktów ubocznych procesów spalania, procesów dezynfekcji oraz jest składnikiem popularnych środków czystości [8]. Formaldehyd identyfikowano również jako zanieczyszczenie migrujące z butelek PET do wód mineralnych [9-11], a ostatnie badania wyraźnie wykazały, że nowe materiały, w szczególności papier, mogą również zanieczyszczać żywność tym związkiem [12]. Głównym źródłem migracji formaldehydu z naczyń papierowych do żywności mogą być farby, kleje i tusze drukarskie, które często stanowią dodatki wzmacniające i stabilizujące materiał. Żywność spożywana na gorąco (w temperaturze około 50–60°C) lub odgrzewana w kuchenkach mikrofalowych w sposób szczególny może być zanieczyszczona formaldehydem, ponieważ pod wpływem temperatury dochodzi do degradacji termicznej powłok ochronnych naczyń. W następstwie tego tworzą się monomery, m.in. kancerogeny formaldehyd. Niska masa cząsteczkowa tego związku sprzyja jego przenikaniu do żywności [13].

Do identyfikacji i analizy ilościowej formaldehydu powszechne zastosowanie znalazły techniki chromatograficzne, np. chromatografia gazowa w układzie z detektorem wychwytu elektronów (GC-ECD, ang. Gas Chromatography with Electron Capture Detector) lub detektorem mas (GC-MS) [14-17]. Pozwalają one na identyfikację formaldehydu występującego w próbkach na niskich poziomach stężeń (ng/l). Jednak dużymi ograniczeniami tych metod jest wysoki koszt aparatury i odczynników, potrzeba stosowania rozpuszczalników, czasochłonność oraz pracochłonność, co jest związane z koniecznością wstępnego przygotowania próbek do analizy tj. z procesami: oczyszczania, wzbogacania próbek, desorpcji, ekstrakcji, czy derywatyzacji.

Mając na uwadze istotne ograniczenia metod chromatograficznych, celowe jest opracowanie alternatywnej metody pozwalającej na szybki sposób oznaczania formaldehydu jako zanieczyszczenia uwalnianego z tzw. naczyń ekologicznych w trakcie ogrzewania. Zaproponowanym w tym artykule rozwiązaniem jest wykorzystanie czujników elektrochemicznych, które umożliwiają pomiar formaldehydu w czasie rzeczywistym, bez potrzeby uciążliwego przygotowania próbek do badań.



Rys. 1. Ogólny schemat zaprojektowanego urządzenia umieszczonego na stanowisku laboratoryjnym

Takie czujniki mogą być podłączone do mikrokontrolerów np. z rodziny Arduino [18], wykorzystywanych w tzw. systemach wbudowanych. Jednym z takich czujników jest wykorzystany przez nas układ PMS5003 [19, 20]. Umożliwia on pomiar następujących parametrów powietrza: temperatury, wilgotności względnej, stężenia formaldehydu w efektywnym zakresie  $0 \pm 1 \text{ mg/m}^3$ , stężenia pyłu zawieszonego PM1, PM2.5 i PM10. We wcześniejszych naszych badaniach [8, 21, 22] został on użyty do analizy próbek powietrza atmosferycznego za pomocą drona (ang. UAV, unmanned aerial vehicle).

W niniejszym artykule zaproponowano analogiczne urządzenie, które może zostać wykorzystane do szybkiej analizy stężenia formaldehydu w próbkach powietrza pobieranych z nad ogrzewanych naczyń.

Badania rozbudowano o jednoczesną adsorpcję próbek gazowych na rurkach sorpcyjnych z wkładem XAD-2, co umożliwia przeprowadzenie analizy chromatograficznej GC-ECD. Jej poszczególne etapy zostały szczegółowo omówione we wcześniejszych pracach [8, 12].

Artykuł jest zorganizowany następująco: w punkcie 2. przedstawiono budowę zaproponowanego urządzenia pomiarowego, w punkcie 3. – opracowane oprogramowanie wraz z jego funkcjonalnością. W kolejnej sekcji opisano przeprowadzony eksperyment i uzyskane wyniki. Punkt 5. zawiera krótkie podsumowanie.

## 2. Budowa proponowanego urządzenia

Opracowane urządzenie jest częścią stanowiska laboratoryjnego, na którym fragment rozdrobnionego naczynia papierowego o masie 5 gramów umieszcza się w słoju ze szkła borokrzemowego i ogrzewa przy pomocy zewnętrznej grzałki. Opary pochodzące z badanej próbki wprowadzane są wężykami do urządzenia, które wykorzystuje czujnik PMS5003 i na bieżąco rejestruje dane pomiarowe (drugi

czujnik zamontowano do walidacji danych pomiarowych). Próbkę powietrza mogą być także przepuszczane w ciągu nastawionego czasu przez 3 niezależne, zamontowane w urządzeniu, szklane rurki wypełnione sorbentem. Dodatkowo urządzenie steruje pracą grzałki, utrzymując ustaloną temperaturę badanych próbek. Ogólny schemat opracowanego urządzenia przedstawiono na rysunku 1.

Urządzenie jest zasilane z sieci elektrycznej 230 V za pomocą modułu zasilacza prądu stałego o napięciu 12 V i mocy 3 W. Do wytworzenia napięcia 5 V zasilającego mikrokontroler ESP32 oraz pozostałe czujniki i przełączniki zastosowano podłączoną szeregowo przetwornicę step-down. Bezpośrednio do mikrokontrolera ESP32 są podłączone:

- ekran OLED o przekątnej 0,96" z kontrolerem SSD1309 [23], na którym są wyświetlane bieżące ustawienia urządzenia i wyniki pomiarów
- 2 przyciski sterujące
- czytnik kart pamięci SD, dzięki któremu zapisywane są wyniki pomiarów
- wodoodporna sonda z czujnikiem temperatury DS18B20 (możliwa praca w temperaturach  $-55 \pm 125^\circ\text{C}$ ), która mierzy temperaturę w słoju ze szkła borokrzemowego
- zabezpieczenie termiczne odłączające zasilanie czujników PMS5003 w przypadku przekroczenia dopuszczalnej temperatury badanego powietrza ( $60^\circ\text{C}$ ) wykonane w postaci przełącznika tranzystorowego z tranzystorem MOSFET 2N7000
- moduł z dwoma przełącznikami SRD-05 (wbudowana optoizolacja).

Pierwszy przełącznik steruje załączaniem grzałki podgrzewającej słoje ze szkła borokrzemowego (grzałkę podłącza się do gniazda elektrycznego wbudowanego w urządzenie), a drugi – zasilaniem trzech przetwornic step-down, z których każda zasila jedną mikropompkę zasysającą po-

wietrze przez rurki sorpcyjne. Ponieważ każda z przetwornic ma potencjometr regulujący napięcie wyjściowe, zatem możliwe jest wyregulowanie mikropompek, aby każda z nich wytwarzała taki sam przepływ powietrza (do osiągnięcia tego stanu w oprogramowaniu urządzenia przewidziano osobny tryb kalibracji).

Ze względu na stabilne parametry pracy wybrano mikropompki próżniowe SC301P [24], które działają w zakresie napięć 2,5÷6 V. Wymagały one dodatkowego uszczelnienia taśmą teflonową, aby zasilane napięciem 5,9 V zapewniały niezbędny przepływ powietrza (112,8 ml/min).

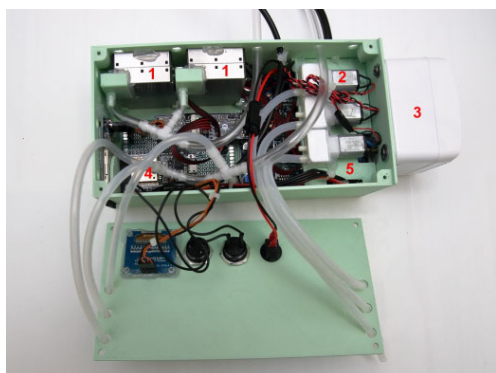
Obudowę urządzenia wykonano w technologii druku 3D z filamentu PLA. Dla bezpieczeństwa użytkownika część, w której znajduje się zasilacz 12 V i przełączniki, jest zabudowana pod antresolą, na której umieszczono mikropompki.

Instalację pneumatyczną wykonano z silikonowych wężyków o wewnętrznych przekrojach 3,5 i 4 mm oraz pasujących do nich rozgałęźników. Przyłącza rurek sorpcyjnych (na wieczku urządzenia) wykonano z silikonowego węża o wewnętrznej średnicy 8 mm, tożsamej ze średnicą używanych rurek sorpcyjnych. Do połączenia węży użyto odpowiednich samozaciskowych przejściówek, umożliwiając łatwe rozłączanie instalacji w celu wymiany rurek oraz mostkowania przyłącza, gdy nie jest ono wykorzystywane (pomiar z użyciem tylko 1 lub 2 rurek). Do mostkowania używa się złączek, które mają uchwyty w wieczku pod złączkami rurek sorpcyjnych.

Widok zewnętrzny urządzenia pokazano na rysunku 2, a wewnętrzny – na rysunku 3.



Rys. 2. Widok zewnętrzny urządzenia: 1 – złącza rurek sorpcyjnych, 2 – rurki sorpcyjne, 3 – ekran OLED, 4 – przyciski sterujące, 5 – włącznik, 6 – złączki do mostkowania, 7 – karta pamięci SD wsunięta w czytnik



Rys. 3. Widok wewnętrzny urządzenia: 1 – czujniki PMS5003, 2 – mikropompki, 3 – gniazdo elektryczne do podłączenia grzałki, 4 – mikrokontroler ESP32, 5 – antresola

### 3. Oprogramowanie i funkcjonalność

Oprogramowanie urządzenia przygotowano w środowisku programistycznym Arduino [18]. Komunikacja z użytkownikiem odbywa się za pomocą przycisków i ekranu, na

którym są wyświetlane istotne parametry pracy urządzenia (rysunek 4).

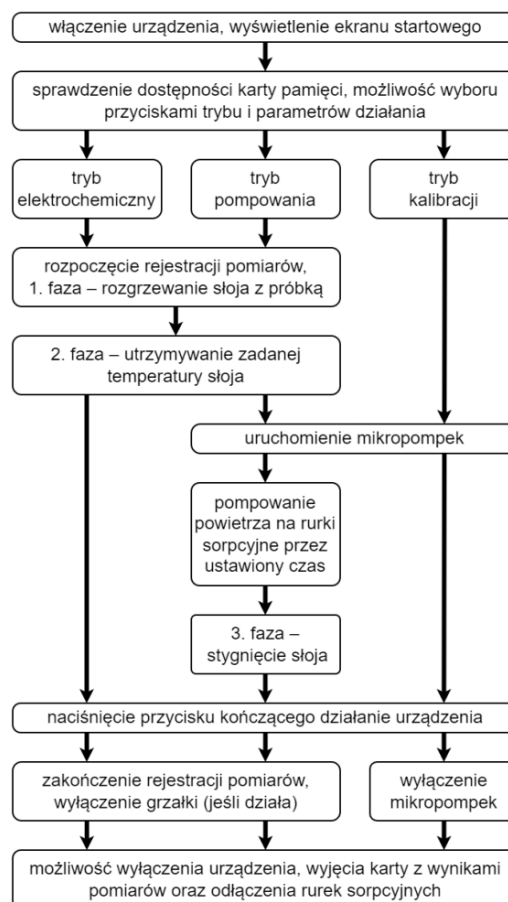
Po przygotowaniu stanowiska laboratoryjnego z badaną próbką i włączeniu urządzenia wyświetla się ekran startowy. Urządzenie sprawdza dostępność karty pamięci i umożliwia uruchomienie w jednym z trzech trybów:

- elektrochemicznym
- pompowania
- kalibracji

a następnie działa zgodnie z algorytmem przedstawionym na rysunku 5.



Rys. 4. Ekran użytkownika: 1 – numer serii pomiarowej, 2 – czas od rozpoczęcia pomiarów, 3 – bieżący czas pompowania, 4 – ustawiony czas pompowania albo wybór trybów kalibracji, bądź trybu wykorzystania czujnika elektrochemicznego, 5 – nastawiona temperatura, 6 – rozpoczęcie działania urządzenia, 7 – bieżąca faza pomiarów, 8 – załączenie grzałki, 9 – zapis danych na karcie SD, 10 – załączenie mikropompek, 11 – ostrzeżenie termiczne o grożącym wyłączeniu czujników PMS5003, 12 – informacja o braku odczytu z czujnika PMS5003, 13 – temperatura w stoju, 14 – odczyt z czujnika PMS5003



Rys. 5. Algorytm działania urządzenia

W trybie pompowania jest możliwe pompowanie powietrza przez rurki w ciągu ustawionego czasu 2÷12 minut po rozgrzaniu stoja do ustawionej temperatury 25÷80°C (parametry 4. i 5. na rysunku 4). Po włączeniu tego trybu uru-

chamia się grzałka oraz zapis danych na karcie, o czym użytkownika informują odpowiednie ikony na ekranie. Osiągnięcie ustawionej temperatury uruchamia licznik bieżącego czasu pompowania (nr 3 na rysunku 4) i mikropompki, a temperatura w słoju jest utrzymywana do zakończenia pompownia. Następnie grzałka jest wyłączana. Zapis pomiarów odbywa się aż do ich zatrzymania przez użytkownika. Wśród rejestrowanych danych, oprócz wskazań z czujnika PMS5003, są zapisywane następujące dane:

- automatycznie nadany numer serii pomiarowej, nastawiony czas pompowania i temperatura
- czas od uruchomienia pomiarów i bieżący czas pompowania
- załączenie mikropompek i grzałki
- zadziałanie zabezpieczenia termicznego
- temperatura w słoju.

Zapis danych odbywa się co 5 sekund do pliku w formacie CSV (osobny plik na każdą serię pomiarową), co umożliwia łatwy import danych do programu MS Excel.

W trybie elektrochemicznym urządzenie działa analogicznie, jednak nie jest uruchamiane pompowanie, a temperatura w słoju jest utrzymywana aż do zatrzymania pomiarów przez użytkownika.

Z kolei tryb kalibracji umożliwia jedynie włączenie mikropompek i – przy wykorzystaniu zewnętrznego przepływomierza – zrównanie ich przepływów. Kalibracja odbywa się poprzez regulację napięć na potencjometrach przetwornic zasilających poszczególne mikropompki.

#### 4. Eksperyment

Jedną z możliwych aplikacji zaprezentowanego urządzenia jest identyfikacja i wyznaczenie stężenia formaldehydu uwalnianego z 5-gramowej próbki naczynia papierowego (kubek pokryty nadrukiem z warstwą ochronną po wewnętrznej stronie) w temperaturze 40°C. Pomiaru dokonano w czasie rzeczywistym przy użyciu czujników oraz trzech rurek sorpcyjnych z wkładem XAD-2, przez które pompowano powietrze przez 5 minut po rozgrzaniu próbki (od minuty 12:32). Umożliwiło to przeprowadzenie analizy chromatograficznej (GC-ECD), którą potraktowano w niniejszych badaniach jako analizę wzorcową, pozwalającą określić precyzyjnie wskazania czujnika PMS5003.

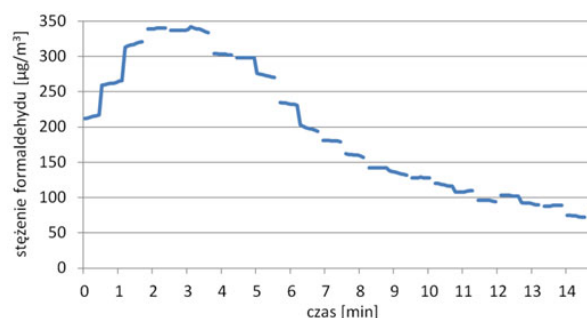
Szczególną zaletą stosowania czujników elektrochemicznych (np. czujnika PMS5003) w jakościowych pomiarach zanieczyszczeń, jest możliwość uzyskania szybkiej odpowiedzi dotyczącej bezpieczeństwa materiałów naczyń. Dodatkowo obserwacja zmian stężenia formaldehydu w czasie rzeczywistym, jako przykładowego markera zanieczyszczeń, pozwala wykazać tendencję uwalniania niepożądanych związków do żywności w trakcie ogrzewania.

Wyniki uzyskane z czujnika PMS5003 w ujęciu czasowym (od rozpoczęcia pompowania powietrza przy temperaturze 40°C) przedstawiono na rysunku 6. Po ustabilizowaniu temperatury zaobserwowano wzrost stężenia formaldehydu uwalnianego z naczyń papierowych. Wyraźnie widać również rosnącą tendencję wskazań czujnika, co oznacza, że prawdopodobnie w tym czasie dochodzi do procesów rozkładu polimerowych powłok ochronnych naczyń papierowych, w których formaldehyd stanowi jeden z produktów. Innym źródłem tego związku może być również rozkład tuszów drukarskich. Przy dłuższym ogrzewaniu można zaobserwować malejące stężenia formaldehydu, co wskazuje na jego degradację termiczną pod wpływem czasu.

Wyniki te sugerują, że żywność pozostająca w krótkim kontakcie z naczyniem papierowym może być szczególnie narażona na zanieczyszczenie formaldehydem.

W celu oceny ilościowych wskazań czujnika PMS5003 porównano jego odczyty ze stężeniem formaldehydu wyznaczonym za pomocą chromatografii gazowej w układzie

z detektorem wychwytu elektronów (GC-ECD). Przygotowanie próbki do chromatograficznego oznaczenia formaldehydu w oparach uwalnianych z naczyń papierowych obejmowało desorpcję próbek z rurek sorpcyjnych przy użyciu 2 ml metanolu, następnie derywatyzację za pomocą 2,3,4,5,6-pentafluorobenzylhydroksyloaminy (PFBOA) o stężeniu 2 mg/ml oraz ekstrakcję typu ciecz-ciecz (LLE, ang. liquid-liquid extraction) heksanem. Za pomocą techniki GC-ECD wyznaczono średnie stężenie formaldehydu w próbkach, które wynosiło 216  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Uzyskany wynik uwzględnia przepływ powietrza (112,8 ml/min), czas poboru próbki (5 minut), 282-krotne załadowanie próbki w efekcie procesu desorpcji oraz 75% odzysk.



Rys. 6. Pomiary uwalnianego formaldehydu w temperaturze 40°C

W czasie pobierania próbek powietrza na rurki sorpcyjne czujnik PMS5003 wskazał średnio stężenie 297  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . W porównaniu z wynikiem analizy GC-ECD, wartość ta jest zawyżona, jednak może być to związane z obecnością w analizowanych próbkach również innych związków karbonylowych, które często występują w mieszaninach. Oprócz formaldehydu analiza GC-ECD wykazała obecność w próbkach acetaldehydu (2,41  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), acetonu (32,2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) oraz propanalu (68,1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Związki te charakteryzują się budową zbliżoną do formaldehydu, więc mogą zakłócać wskazania użytego czujnika PMS5003. Ponadto analiza chromatograficzna pozwoliła zidentyfikować w oparach znad ogrzewanego papieru heksanal (31,2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) oraz nonanal (158,1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), które należą do związków aktywnych sensorycznie i odpowiadają za kształtowanie charakterystycznego, kartonowego zapachu.

#### 5. Podsumowanie

W artykule zaprezentowano urządzenie oraz możliwość jego użycia do identyfikacji i pomiaru stężenia formaldehydu uwalnianego podczas ogrzewania naczyń papierowych, zarówno z wykorzystaniem komercyjnie dostępnego czujnika elektrochemicznego PMS5003 jak i czulej techniki chromatograficznej GC-ECD.

Zastosowany czujnik PMS5003 pozwolił wyznaczyć stężenie uwalnianego formaldehydu z popularnych obecnie naczyń papierowych. Średnie stężenie formaldehydu w oparach z naczyń papierowych, wyznaczone za pomocą czujnika elektrochemicznego, jest nieco wyższe niż to, wyznaczone za pomocą analizy GC-ECD. Przyczyną rozbieżności mogą być inne związki karbonylowe obecne w analizowanych próbkach, które są odpowiedzialne za podwyższone wskazania czujnika elektrochemicznego PMS5003.

Wykrycie formaldehydu, jako markera zanieczyszczeń uwalnianych w trakcie ogrzewania naczyń papierowych, stanowi wyraźny sygnał ostrzegawczy przed używaniem tego typu naczyń do szybkiego podgrzewania żywności.

*Badania sfinansowano z subwencji badawczej 0211/SBAD/0224.*

**Autorzy:** dr inż. Adam Konieczka, Politechnika Poznańska, Wydział Automatyki, Robotyki i Elektrotechniki, ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań, E-mail: [adam.konieczka@put.poznan.pl](mailto:adam.konieczka@put.poznan.pl); mgr inż. Karolina Brończyk, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Wydział Chemii, ul. Uniwersytetu Poznańskiego 8, 61-614 Poznań, E-mail: [karolina.bronczyk@amu.edu.pl](mailto:karolina.bronczyk@amu.edu.pl); mgr inż. Michał Adamski, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Wydział Chemii, ul. Uniwersytetu Poznańskiego 8, 61-614 Poznań, E-mail: [michal.adamski@amu.edu.pl](mailto:michal.adamski@amu.edu.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); prof. dr hab. inż. Adam Dąbrowski, Politechnika Poznańska, Wydział Automatyki, Robotyki i Elektrotechniki, ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań, E-mail: [adam.dabrowski@put.poznan.pl](mailto:adam.dabrowski@put.poznan.pl)

#### LITERATURA

- [1] Komisja Europejska (2019), Dyrektywa (UE) nr 904/2019 z dnia 5 czerwca 2019 r. w sprawie ograniczenia wpływu niektórych wyrobów z tworzyw sztucznych na środowisko. Tekst mający znaczenie dla EOG: dyrektywa (UE) nr 904/2019
- [2] Geueke B., Groh K., Muncke J., Food packaging in the circular economy: Overview of chemical safety aspects for commonly used materials. *Journal of Cleaner Production*, 193 (2018), 491-505.
- [3] Komisja Europejska (2011), Rozporządzenie Komisji (UE) nr 10/2011 z dnia 14 stycznia 2011 r. w sprawie materiałów i wyrobów z tworzyw sztucznych przeznaczonych do kontaktu z żywnością. Tekst mający znaczenie dla EOG: rozporządzenie (UE) nr 10/2011
- [4] Baele M., Vermeulen A. i in., Migration of surrogate contaminants from paperboard to foods: Effect of food and surrogate properties, *Food Additives and Contaminants: Part A*, 37 (2020), 2165-2183
- [5] Khaustov A., Redina M., Goryainov S., Migration of PAHs and Phthalates from Package Materials during Water Storage: Glass or Plastic?, *Polycyclic Aromatic Compounds*, 42 (2022), 358-370
- [6] Krivohlavek A., Mikulec N. i in., Migration of BPA from Food Packaging and Household Products on the Croatian Market, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 20 (2023), 2877
- [7] International Agency for Research on Cancer [IARC]. Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, *Formaldehyde, 2-Butoxyethanol and 1-tert-Butoxypropan-2-ol*, (2006) <https://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol88/mono88.pdf> (dostęp: 19.10.2017 r.)
- [8] Brończyk K., Adamski M., Dąbrowska A., Konieczka A., Dąbrowski A., Two approaches (GC-ECD and electrochemical sensors signals processing) to the determination of carbonyl compounds as markers of air pollution, *2023 Signal Processing: Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications (SPA)*, Poznan, Poland, 2023, 66-70, doi: 10.23919/SPA59660.2023.10274453
- [9] Redžepović A.S., Ačanski M.M., Vujićvera D.N., Lazić L., Determination of carbonyl compounds (acetaldehyde and formaldehyde) in polyethylene terephthalate containers designated for water conservation, *Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly*, 18 (2012), 155-161
- [10] Cardozo I.M.M., dos Anjos J.P., da Rocha F.O.C., de Andrade J.B., Exploratory analysis of the presence of 14 carbonyl compounds in bottled mineral water in polyethylene terephthalate (PET) containers, *Food Chemistry*, 365 (2021), 130475
- [11] Abe Y., Kobayashi N. i in., Determination of formaldehyde and acetaldehyde levels in poly(ethylene terephthalate) (PET) bottled mineral water using a simple and rapid analytical method, *Food Chemistry*, 344 (2021), 128708
- [12] Brończyk, K., Dąbrowska, A., Majcher, M., Carbonyl compounds as contaminants migrating from the ecological vessels to food, *Food Packaging and Shelf Life*, 39 (2023), 101139
- [13] Leks-Stępień J., Headspace-GC determination of volatile organic compounds from the printed paper packaging materials, *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 31 (2016), 521-524
- [14] Baños C.E., Silva M., In situ continuous derivatization/pre-concentration of carbonyl compounds with 2,4-dinitrophenylhydrazine in aqueous samples by solid-phase extraction. Application to liquid chromatography determination of aldehydes, *Talanta*, 77 (2009), 1597-1602
- [15] Hyun-Ji K., Ho-Sang S., Simple and automatic determination of aldehydes and acetone in water by headspace solid-phase microextraction and gas chromatography-mass spectrometry, *Journal of Separation Science*, 34 (2011), 693-699
- [16] Marín-Morocho K., Domenek S., Salazar R., Identification of potential migrants in polyethylene terephthalate samples of Ecuadorian market, *Polymers*, 13 (2021), 3769
- [17] Moura T.O., Santana F.O. i in., Inorganic and organic contaminants in drinking water stored in polyethylene cisterns, *Food Chemistry*, 273 (2019), 45-51
- [18] What is Arduino?, <https://www.arduino.cc/> (dostęp: 16.03.2024 r.)
- [19] Air Quality Monitor (PM 2.5, Formaldehyde, Temperature & Humidity Sensor), <https://www.dfrobot.com/product-1612.html> (dostęp: 16.03.2024 r.)
- [20] Yong Z., Digital universal particle concentration sensor. PMS5003ST series data manual, [https://github.com/ArduinoLibrary/DFRobot\\_SEN0233\\_Air\\_Quality\\_Monitor/raw/master/PMS5003ST%20series%20data%20manua\\_English\\_V2.6%20.pdf](https://github.com/ArduinoLibrary/DFRobot_SEN0233_Air_Quality_Monitor/raw/master/PMS5003ST%20series%20data%20manua_English_V2.6%20.pdf) (dostęp: 16.03.2024 r.)
- [21] Adamski M., Konieczka A., Dąbrowska A., Dąbrowski A., Analytics of air samples collected with an apparatus coupled to UAV in air quality monitoring, *2022 Signal Processing: Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications (SPA)*, Poznan, Poland, 2022, 141-145, doi: 10.23919/SPA53010.2022.9927890
- [22] Konieczka A., Adamski M., Dąbrowski A., Dąbrowska A., Badanie jakości powietrza z wykorzystaniem czujników elektrochemicznych i technik chromatograficznych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 10/2023, 256-259, doi: 10.15199/48.2023.10.53
- [23] OLE-1280064D-BPP3N00000, Vishay, <https://www.vishay.com/en/product/37968/> (dostęp: 16.03.2024 r.)
- [24] Kamami.pl, SC301P - mini pompa próżniowa 3V, <https://kamami.pl/pompy-mechanika/587637-sc301p-mini-pompa-proz-niowa-3-v.html> (dostęp: 16.03.2024 r.)