

prof. dr hab. Kazimierz Szymański

Koszalin, 08.11.2024

ul. Śniadeckich 2

75-453 Koszalin



**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Michała Adamskiego pt. "  
Opracowanie metody poboru próbek i analizy wybranych zanieczyszczeń  
środowiska za pomocą urządzeń pomiarowych sprzężonych z  
bezzałogowym statkiem powietrznym"**

**1. Podstawa prawna recenzji**

Rada Naukowa Dyscypliny Nauki Chemiczne Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu w dniu 11 października 2024 roku, działając na podstawie *art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* podjęła decyzję o powołaniu mojej osoby - prof. dr hab. Kazimierza Szymańskiego na recenzenta rozprawy doktorskiej mgr. inż. Michała Adamskiego pt. "**Opracowanie metody poboru próbek i analizy wybranych zanieczyszczeń środowiska za pomocą urządzeń pomiarowych sprzężonych z bezzałogowym statkiem powietrznym**". Promotorem rozprawy jest prof. UAM dr hab. inż. Agata Dąbrowska.

**2. Charakterystyka rozprawy doktorskiej i działalności naukowej Doktoranta**

Rozprawa doktorska mgr. inż. Michała Adamskiego została zredagowana na 141 stronach tekstowych, w tym zawiera streszczenie w języku polskim i angielskim. Autor cytuje 177 pozycji literaturowych, głównie w języku angielskim. W rozprawie zamieszcza 48 rysunków, ilustrujących wyniki badań oraz ich analizę, jak też 24 tabele. Układ rozprawy można ocenić jako poprawny. Rozprawa składa się z 9 rozdziałów oraz obszerny wykaz akronimów, pomocny przy analizie prezentowanej w pracy problematyce. Doktorant w rozprawie zamieszcza również dorobek naukowy w tym pięć publikacji. W jednej jest głównym współautorem, posiada dwa zgłoszenia patentowe w których w jednym przypadku jest głównym autorem. W zakresie udziału w konferencjach międzynarodowych Doktorant uczestniczy w trzech wydarzeniach naukowych, prezentując osobiście poszczególne referaty, a też w sesji plakatowej na prawach współautora. W zakresie konferencji krajowych bierze udział w opracowaniu trzech plakatów, jako współautor. Bierze udział w realizacji projektu - Inkubator Innowacyjności 4.0. Prezentował również ciekawe elementy wykładów w tym w 13 edycji Nocy Naukowców, które były nawiązaniem do zainteresowań naukowych ocenianego.

Został również wyróżniony za prezentację referatu na konferencji o charakterze międzynarodowym w Poznaniu w 2020 roku.

### 3. Analiza szczegółowa rozprawy doktorskiej

Obserwowane w kraju i na całym świecie zanieczyszczenie środowiska naturalnego człowieka wymaga stosowania coraz skuteczniejszych metod oceny tego zjawiska. Tym samym oceniana rozprawa doktorska mgr. inż. Michała Adamskiego, w której podnosi problem adaptacji bezzałogowych statków powietrznych (BSP) do przenoszenia sprzętu kontrolno-pomiarowego w celu zbierania danych w czasie rzeczywistym z wielu punktów lub pobierania próbek do analizy w laboratorium stacjonarnym, zasługuje na uznanie. Dzięki swojej mobilności BSP mogą być wykorzystywane zarówno do badań na większych obszarach, jak i do analizy punktowych źródeł emisji. Główne zalety bezzałogowych statków powietrznych (popularnych dronów), dzięki stosunkowo niskim kosztom, łatwości obsługi oraz możliwość adaptacji do różnych zastosowań, stwarza bezsprzecznie nowe możliwości obserwacji miejsc zdegradowanych przez różne formy działalności człowieka. Doktorant precyzuje cel badawczy rozprawy, który wskazuje na możliwości poboru i analizy próbek przy właściwie dobranych urządzeniach pomiarowych, sprzężonych z BSP, monitorujących zanieczyszczenie środowiska. Jako markery do oceny tego środowiska wybiera wysoko polarne aldehydy, które mogą być syntetyzowane w warunkach naturalnych i antropogenicznych. Stosuje do oceny tych związków techniki analityczne przyjazne środowisku (elementy "zielonej chemii"). Wykorzystuje przy tym elementy procesu derywatywacji oraz dyspersyjnej mikroekstrakcji w układzie ciecz-ciecz (DLLME-SFO), wykorzystując chromatograf gazowy sprzężony z selektywnym detektorem wychwytu elektronów (GC-ECD). Szczegółowy zakres pracy Doktoranta obejmował:

- wybór i przetestowanie bezzałogowego statku powietrznego (BSP),
- wybór urządzeń sensorycznych i ich przetestowanie,
- opracowanie urządzenia do pobierania próbek sprzężonego z platformą BSP,
- opracowanie metodyki pobierania próbek,
- opracowanie metodyki analitycznej pozwalającej na oznaczenie w próbkach środowiskowych wybranych związków na niskich poziomach stężeń (przygotowanie procesów derywatywacji, technik ekstrakcji, wykorzystanie technik chromatograficznych).

W rezultacie Doktorant zainicjował prace związane z opracowaniem metodyki pomiarowej uwzględniającej współpracę urządzeń sprzężonych z bezzałogowym statkiem powietrznym i wykonanych eksperymentów w środowisku pozwalających na sformułowanie tezy badawczej. Pozwoliło to na szybkie prowadzenie monitoringu zanieczyszczeń środowiska z wykorzystaniem aldehydów jako markerów. Doktorant, w ramach realizacji projektu Inkubator Innowacyjności 4.0. opracował aparaturę kontrolno-pomiarową, która posłużyła do badań własnych. W tym zakresie współpracował z Zakładem Układów Elektronicznych i Przetwarzania Sygnałów Instytutu Automatyki i Robotyki Politechniki Poznańskiej. Wynikiem tej współpracy był dwa zgłoszenia patentowe (P.442895 oraz P.4428 906) dot. urządzenia do pomiaru czystości powietrza oraz sposób kalibracji niskokosztowych czujników jakości powietrza. Opracowane urządzenie łączy w sobie najnowsze osiągnięcia

technologiczne w dziedzinie automatyzacji i bezzałogowych statków powietrznych, oferując rozwiązania dla pobierania próbek w trudno dostępnych i rozległych obszarach jak i pomiar zanieczyszczeń w czasie rzeczywistym. Integracja z BSP umożliwia precyzyjne i efektywne pobieranie próbek w miejscach, które byłyby trudne do osiągnięcia za pomocą tradycyjnych metod, co znacząco zwiększa zakres i efektywność monitorowania środowiska. W tym celu zostało zbudowane urządzenie, które charakteryzuje się zaawansowanymi funkcjonalnościami, takimi jak automatyczne ustawianie parametrów pobierania próbek oraz optymalizacją doboru czujników elektrochemicznych, realizujących pomiar w czasie rzeczywistym. Aparatura do pobierania próbek powietrza umożliwiła gromadzenie próbek w kontrolowanych warunkach do późniejszej analizy chemicznej przy użyciu technik chromatograficznych. Równocześnie, czujniki elektrochemiczne zamontowane w urządzeniu przeprowadzały bieżące pomiary jakości powietrza, rejestrując stężenia poszczególnych zanieczyszczeń. Dzięki temu możliwe było uzyskiwanie aktualnych danych dotyczących czystości powietrza, co stanowiło cenne uzupełnienie wyników analizy chemicznej. Porównanie wyników uzyskanych obiema metodami umożliwiło wyznaczenie zależności kalibracyjnych. Te zależności mogą potencjalnie pozwolić na precyzyjne dostosowanie wskazań czujników elektrochemicznych. Poszczególne rysunki 16, 17 i 18 ilustrują dokładny opis zbudowanej aparatury kontrolno-pomiarowej do poboru i analizy próbek powietrza. Integracja urządzenia z bezzałogowym statkiem powietrznym znacząco zwiększa jego funkcjonalność. Umożliwiła też efektywne pobieranie i analizowanie próbek powietrza z różnych lokalizacji, w tym z miejsc trudno dostępnych, które są istotne z perspektywy monitorowania zanieczyszczeń powietrza. Umożliwiła ona efektywne pobieranie i analizowanie próbek powietrza z różnych lokalizacji, w tym z miejsc trudno dostępnych, które są istotne z perspektywy monitorowania zanieczyszczeń powietrza. Dzięki zastosowaniu BSP, urządzenie może przeprowadzać pomiary w takich miejscach jak kominy fabryczne, kominy domowe oraz arterie drogowe. W kontekście realizacji badań naukowych z wykorzystaniem zaawansowanych technologii monitoringu powietrza, kluczowym elementem było odpowiednie dobranie bezzałogowego statku powietrznego (BSP). Wybór odpowiedniego modelu musiał uwzględniać szereg kryteriów technicznych, takich jak udźwig, czas lotu, stabilność w locie, precyzja nawigacji oraz kompatybilność z aparaturą kontrolno-pomiarową. Po przeanalizowaniu dostępnych na rynku rozwiązań, zdecydowano się na model H520 firmy Yuneec, który spełnia wszystkie wymagania stawiane przez realizowany projekt badawczy. Model H520 to hexacopter, czyli bezzałogowy statek powietrzny wyposażony jest w sześć wirników. Konstrukcja ta zapewnia większą stabilność w locie oraz zwiększoną nośność w porównaniu do standardowych quadcopterów. W przypadku badań wymagających precyzyjnego przenoszenia aparatury kontrolno-pomiarowej, stabilność lotu jest kluczowa, ponieważ minimalizuje wpływ wibracji i ruchów bocznych na dokładność pomiarów. H520 charakteryzuje się również solidną konstrukcją, która zapewnia odporność na niekorzystne warunki atmosferyczne i mechaniczne uszkodzenia, co jest istotne w kontekście badań prowadzonych w zróżnicowanych środowiskach terenowych. Jego wytrzymała budowa, w połączeniu z zaawansowanymi systemami nawigacyjnymi, umożliwia wykonywanie skomplikowanych misji badawczych z dużą dokładnością. Jednym z kluczowych parametrów, który zadecydował o wyborze modelu H520, jest jego zdolność do długotrwałego lotu. W konfiguracji z aparaturą kontrolno-pomiarową czas lotu wynosi około 25 minut, co jest wystarczające do przeprowadzenia kompleksowych pomiarów w terenie. Maksymalny czas lotu, bez obciążenia, wynosi do 28 minut, co dodatkowo zwiększa elastyczność operacyjną w sytuacjach wymagających dłuższego czasu na zbieranie danych. Dzięki zwiększonej nośności, wynoszącej do 500 g, H520 może przenosić różnorodną aparaturę badawczą, w tym czujniki

elektrochemiczne oraz układy do poboru próbek powietrza, bez znaczącego wpływu na manewrowość czy stabilność lotu. Jest to szczególnie ważne w kontekście badań nad emisjami zanieczyszczeń, gdzie precyzja i powtarzalność pomiarów mają kluczowe znaczenie. Model H520 wyposażony jest w szereg zaawansowanych systemów bezpieczeństwa, takich jak automatyczny powrót do miejsca startu (Return-to-Home) oraz system omijania przeszkód. Funkcja automatycznego powrotu jest szczególnie przydatna w sytuacjach awaryjnych, gdy BSP traci łączność z operatorem lub gdy poziom baterii jest niski. System omijania przeszkód zwiększa bezpieczeństwo operacji, zwłaszcza w trudnym terenie lub w warunkach ograniczonej widoczności. Zaawansowany kompas oraz system GPS pozwalają na precyzyjną nawigację, co jest niezbędne podczas realizacji skomplikowanych misji badawczych, wymagających dokładnego odwzorowania trajektorii lotu. Zintegrowany system diod oświetleniowych oraz jaskrawy kolor urządzenia dodatkowo ułatwiają jego lokalizację w terenie, zwłaszcza w warunkach ograniczonej widoczności, takich jak mgła czy zmierzch. Szczegółową specyfikację dobrego modelu bezzałogowego statku powietrznego oraz jego zdjęcie przedstawiono na stronach 68-69.

#### 4. Podsumowanie

Wykorzystywane w badaniach urządzenia (H520) uwzględniało szereg kryteriów technicznych, takich jak udźwig, czas lotu, stabilność w locie, precyzja nawigacji oraz kompatybilność z aparaturą kontrolno-pomiarową. Model H520 firmy Yuneec, spełniał wszystkie wymagania stawiane przez realizowany projekt badawczy jako bezzałogowy statek powietrzny wyposażony w sześć wirników. Szczegółową specyfikę tego modelu Doktorant omawia na stronach 68-69 oraz ilustruje na rysunkach 15 - 17. Ważnym elementem rozprawy doktorskiej jest prezentacja układu do analizy emisji zanieczyszczeń z materiałów opakowaniowych. Doktorant wymienia całą gamę materiałów polimerowych, nie ulegających biodegradacji zgodnie z tzw. Dyrektywą Plastikową. Podkreśla pozytywne działania polegające na wprowadzeniu na rynek materiałów ekologicznych, które właściwościami są zbliżone do konwencjonalnych plastików, lecz ulegające biodegradacji. Mając na uwadze zalecenia gospodarki o obiegu zamkniętym wytwarza się nowe materiały pochodzenia roślinnego, przykładowo produkowane z otrębów pszennych, liści palmowych, trzciny cukrowej. W tej grupie należy wymienić m.in. : polilaktydy, skrobię termoplastyczną oraz spieniony polipropylen. Jednakże jak wykazują badania materiały te (np. papier), zawierają formaldehyd i mogą zanieczyszczać żywność. Doktorant podaje przykłady syntezy formaldehydu w warunkach podgrzewania/odgrzewania żywności w kuchenkach mikrofalowych w temperaturze 40-60<sup>0</sup> C i tworzenia się związków aldehydowych. W tym przypadku pomocne w badaniach formaldehydu stają się techniki chromatograficzne w warunkach gdy próbki ww. materiałów monitorujemy przy pomocy specjalnych czujników elektrochemicznych i wówczas gdy próbki pobierane są przy pomocy zainstalowanych w urządzeniu rurek sorpcyjnych z wypełnieniem XAD-2 a wówczas badania możemy prowadzić w stacjonarnym laboratorium. Szczegóły tego procesu oraz schemat ideowy aparatury kontrolno - pomiarowej zilustrowano na rys.18. Próbkę naczyń została poddana działaniu podwyższonej temperatury, symulując warunki, w jakich mogą znaleźć się naczynia podczas użytkowania, np. podczas serwowania gorących napojów. Temperatura w eksperymencie została ustalona na poziomie 40°C, co odpowiada warunkom umiarkowanie podwyższonej temperatury, w której mogą nasilać się już procesy emisji związków chemicznych z materiału opakowaniowego. W celu monitorowania emisji formaldehydu w

czasie rzeczywistym, stosowano czujnik elektrochemiczny PMS5003. Czujnik ten charakteryzuje się wysoką czułością na formaldehyd oraz zdolnością do szybkiego reagowania na zmiany jego stężenia. Zasada działania czujnika polega na elektrochemicznej detekcji formaldehydu, który po wnikięciu do komory pomiarowej ulega reakcji elektrochemicznej, generując sygnał elektryczny proporcjonalny do stężenia tego związku w próbce. Dzięki temu możliwe jest uzyskanie natychmiastowych odczytów, co jest szczególnie istotne w przypadku analiz wymagających dynamicznego monitorowania emisji. Czujnik PMS5003 został umieszczony w komorze pomiarowej, do której wprowadzano powietrze przepływające nad ogrzewanymi próbkami materiałów papierowych. Powietrze to było następnie przepompowywane przez trzy rurki sorpcyjne wypełnione sorbentem XAD-2. Rurki sorpcyjne umożliwiały dodatkowe pobranie próbek powietrza, które mogły zostać poddane późniejszej analizie chromatograficznej, co pozwalało na porównanie wyników uzyskanych za pomocą obu metod. Wyniki uzyskane w układzie GC/ECD pokazały, że średnie stężenie użytego jako markera zanieczyszczenia powietrza - formaldehydu wyniosło  $216 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Jest to wartość bardzo niepokojąca, ponieważ przekracza wartość dopuszczalną ustaloną dla formaldehydu w powietrzu. Oprócz formaldehydu, również zidentyfikowano inne związki karbonyłowe. Suma aldehydów oznaczonych w próbce wyniosła prawie  $770 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Obecność tych związków sugeruje, że poza aldehydami, także inne produkty rozkładu termicznego polimerów, powłok ochronnych oraz tuszy drukarskich obecnych na papierowych naczyniach i opakowaniach żywności, mogą przyczyniać się do emisji różnych lotnych niepożądanych związków organicznych. Równoległe z próbkami pobieranymi na rurki sorpcyjne, realizowane były pomiary zanieczyszczeń on-line, przy użyciu czujnika elektrochemicznego. Pomiary te wykazały średnie stężenie formaldehydu na poziomie  $302,22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Porównanie wyników badań obu metod pomiarowych wykazało, że pomiar uzyskany z użyciem czujnika PMS5003 był wyższy od stężenia formaldehydu oznaczonego w laboratorium metodą GC-ECD. Różnice te mogą wynikać z obecności innych związków karbonylowych w próbkach powietrza, które nie są rozróżniane przez czujnik elektrochemiczny, co prowadzi do zawyżenia wyników. Po osiągnięciu maksymalnych wartości stężenia, w czasie ok. 20 minut obserwowano stopniowy spadek stężenia formaldehydu. Spadek ten można interpretować jako wynik degradacji termicznej formaldehydu, który pod wpływem dalszego ogrzewania ulegał rozkładowi, prowadząc do obniżenia jego koncentracji w badanym środowisku. Tym samym, wyniki te sugerują, że procesy związane z emisją i degradacją formaldehydu z naczyń papierowych przebiegają bardzo dynamicznie, są silnie skorelowane z temperaturą oraz czasem trwania ekspozycji cieplnej. Wyniki pomiarów przedstawiono na stronach od 106 do 110.

Doktorant zaprojektował i wykonał aparaturę do oznaczania zanieczyszczeń przedostających się z samochodów wraz ze spalinami samochodowymi. Testowano takie zanieczyszczenia jak PM<sub>1</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, CO<sub>2e</sub>, TVOC oraz HCHO. Do zbudowania urządzenia pomiarowego wykorzystano trzy sensory elektrochemiczne, które mierzyły wybrane zanieczyszczenia powietrza: DFR-08605 HCHO, SGP30 oraz PMS5003. Parametry sensora DFR-08605 HCHO, zgodnie z deklaracją producenta, obejmowały wykrywalność formaldehydu (HCHO), zakres wykrywania wynosił od 0 do 5 ppm, a rozdzielczość pomiaru wynosiła 0,01 ppm. Czas nagrzewania sensora trwał do 3 minut, a zakres temperatur pracy

wynosił od 0°C do 50°C. SGP30 był wielopikselowym sensorem gazów przeznaczonym do zastosowań w pomiarze jakości powietrza wewnątrz budynków, jednak zdecydowano się go użyć do pomiaru spalin samochodowych, ze względu na jego czułość. Sensor ten podawał dwie wartości: TVOC (całkowita ilość lotnych związków organicznych) w zakresie od 0 do 60 000 ppb oraz CO<sub>2e</sub> (ekwiwalent dwutlenku węgla) w zakresie od 400 do 60 000 ppm. Aby uzyskać te wartości, sensor wykorzystywał dynamiczny algorytm kompensacji oraz wbudowane parametry kalibracyjne. Rozdzielczość sensora dla TVOC wynosiła od 1 ppb dla najniższych wartości do 32 ppb dla najwyższych, natomiast dla CO<sub>2e</sub> od 1 ppm do 31 ppm. Próbkowanie odbywało się z częstotliwością 1 próbki na sekundę, a zakres temperatur pracy wynosił od -40°C do +85°C. Zastosowany układ PMS5003 jest uniwersalnym czujnikiem do pomiaru stężenia cząstek stałych w powietrzu, który działał na zasadzie rozpraszania światła laserowego. Jego zakres pomiarowy obejmował trzy kategorie wielkości cząstek: od 0,3 µm do 1,0 µm, od 1,0 µm do 2,5 µm oraz od 2,5 µm do 10 µm. Czułość sensora wynosi 50% dla cząstek o wielkości 0,3 µm oraz 98% dla cząstek o wielkości 0,5 µm i większych. Czas odpowiedzi sensora wynosi mniej niż 10 sekund, a zakres temperatur pracy wynosi od -20°C do 50°C. Czujniki zostały podłączone do płytki eksperymentalnej ESP32-DevKitC z wbudowanym modułem ESP-WROOM-32. Sensor DFR-08605 HCHO połączono w trybie DAC, czyli trybie pracy z analogowym sygnałem wyjściowym. SGP30 został podłączony przy użyciu protokołu I2C, natomiast PMS5003 za pomocą interfejsu UART. Dane pomiarowe były rejestrowane co 4 sekundy na kartę pamięci SD za pomocą modułu obsługującego ten standard, połączonego z ESP32 poprzez interfejs SPI. Do włączania i wyłączania rejestrowania danych używano przełącznika taktycznego, a rozpoczęcie i zakończenie procesu zapisywania sygnalizowała dioda. Każda seria pomiarowa była zapisywana w osobnym pliku CSV. Urządzenie zasilano akumulatorem Li-Pol o pojemności 4 Ah i nominalnym napięciu 3,7 V, co pozwalało na wielogodzinną pracę. Akumulator podłączono do modułu TP4056, który kontrolował proces ładowania i chronił przed nadmiernym rozładowaniem. Moduł ten posiadał wejście zasilania USB-C, dzięki czemu urządzenie można było ładować za pomocą standardowej ładowarki do smartfonów. Aby dostarczyć niezbędne napięcie 5 V dla ESP32, zastosowano przetwornicę podwyższającą napięcie wyjściowe z akumulatora. Obudowa urządzenia została wykonana z materiału PLA przy użyciu technologii druku 3D. Zdjęcie poglądowe ilustrujące opracowaną aparaturę przedstawione jest na Rysunku 37 a parametry pojazdów są opisane w Tabeli 23 na str. 112. Pomiary spalin silników samochodowych przeprowadzono na biegu jałowym, gdy silniki pracowały na obrotach w zakresie 800-1000 rpm, a następnie na zwiększonych obrotach. Dla pojazdów z silnikiem diesla obroty ustalono na 1500 rpm, natomiast dla pozostałych na 2000 rpm, co wynikało z faktu, że silniki diesla zazwyczaj pracują na niższych obrotach niż silniki benzynowe. Po uruchomieniu silników pojazdy pracowały na biegu jałowym przez 3 minuty, a pomiary przeprowadzono w ostatnich 2 minutach tego okresu. Następnie zwiększono obroty silnika i utrzymano je przez kolejne 3 minuty, z pomiarami dokonanymi w ostatnich 2 minutach. Wyniki pomiarów emisji spalin przedstawiono w Tabeli 24 na stronach 113 i 114 oraz na Rysunkach 39-44 na stronach 112-116. Czynnikiem wpływającym na ilość emitowanych zanieczyszczeń jest głównie rodzaj paliwa. Zauważono, że samochody napędzane benzyną emitują szczególnie wysokie stężenia CO<sub>2e</sub> oraz TVOC, zwłaszcza na początku pracy silnika, w pierwszych dwóch minutach pomiarów, maksymalne dopuszczalne

stężenie PM<sub>10</sub> było przekraczane. W tych samych warunkach pomiarowych znacząco niższe stężenia tych zanieczyszczeń zarejestrowano dla pojazdów z silnikiem diesla i gazowego, które mieściły się w granicach tła pomiarowego. Badania wyraźnie uwidocznily, że samochody napędzane benzyną emitują wyższe stężenia formaldehydu, w niektórych przypadkach stężenia przekraczały zakres pomiarowy czujnika DFR-08605 HCHO. W przypadku większości analizowanych próbek odnotowywano wzrost stężenia formaldehydu po zwiększeniu prędkości obrotowej silnika.

Doktorant przedstawił w pracy dodatkowo, stacjonarne stanowisko do badania pyłu zawieszonego PM<sub>10</sub>. Stanowisko to zlokalizowane było na dachu budynku Wydziału Chemii Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, przy ul. Uniwersytetu Poznańskiego, na kampusie Morasko. Jest to obszar znajdujący się przy północnej granicy miasta, charakteryzujący się specyficznymi uwarunkowaniami geograficznymi. W bliskiej odległości od stanowiska pomiarowego przebiega północna towarowa obwodnica kolejowa, co może wpływać na poziom lokalnych zanieczyszczeń powietrza. Do pomiarów stężenia pyłu zawieszonego PM<sub>10</sub> wykorzystano pyłomierz DustTrack DRX 8533, wyposażony w fotometr laserowy (rysunek 46), który działa na zasadzie pochłaniania promieniowania elektromagnetycznego, zgodnie z prawem Lamberta-Beera. Im większe stężenie pyłu w powietrzu, tym mniej promieniowania laserowego przechodzi przez próbkę. Aparatura ta zapewniała precyzyjne pomiary i była regularnie kalibrowana, aby zagwarantować jakość wyników. Dane pomiarowe uzyskane przy zastosowaniu stacji pomiarowej zlokalizowanej na kampusie Morasko wykazały, że stężenia pyłu PM<sub>10</sub> były najwyższe w okresie jesienno-zimowym (rysunek 47). W miesiącach zimowych odnotowano 23 przypadki przekroczenia dopuszczalnej dobowej normy wynoszącej 50 µg/m<sup>3</sup>, z czego w 6 przypadkach wartości te przekroczyły poziom informowania, wynoszący 100 µg/m<sup>3</sup>. Jest to poziom, przy którym mieszkańcy są informowani o znacznym pogorszeniu jakości powietrza. Średnia dobowa koncentracja pyłu PM<sub>10</sub> w kampusie Morasko wynosiła 38 µg/m<sup>3</sup>, co jest wartością niższą w porównaniu z wynikami zarejestrowanymi w centrum miasta. Najniższe stężenia notowano od marca do sierpnia, co wynikało głównie z braku sezonu grzewczego oraz wyższych opadów atmosferycznych, które efektywnie wymywały zanieczyszczenia z atmosfery. Należy podkreślić, że aldehydy jako wysoko polarne związki, wszechobecne w środowisku powstają często jako produkty uboczne procesów spalania, w tym szczególnie niepożądany formaldehyd. Zostały one wybrane przez Doktoranta, jako ważne markery zanieczyszczenia środowiska. Doktorant zaproponował do ich oznaczania zastosowanie techniki analitycznej, przyjaznej środowisku (tzw. „Zielona chemia”) z wykorzystaniem wstępnego procesu derywatywacji badanych związków oraz dyspersyjnej mikroekstrakcji ciecz-ciecz (DLLME-SFO) w układzie z chromatografem gazowym sprzężonym z selektywnym detektorem wychwytu elektronów (GC-ECD). Technikę tę bardzo precyzyjnie omówił na stronach 84-97. Reasumując poszczególne rozdziały rozprawy należy stwierdzić, że Doktorant rozwiązał wszystkie problemy naukowe w sposób nie budzący wątpliwości recenzenta. Bez wątpienia posiada umiejętności prowadzenia badań naukowych na wysokim poziomie. Umiejętnie wykorzystywał istniejącą w poszczególnych laboratoriach aparaturę naukową, jak również opracował i wdrożył nowe rozwiązania w zakresie oryginalnej aparatury badawczej (dwa zgłoszenia patentowe). Praca naukowa i wdrożeniowa Doktoranta poświęcona zagadnieniom

mikrozanieczyszczeń środowiska naturalnego na przykładzie formaldehydu może wskazywać na potrzebę kontynuacji tych badań.

Za bardzo pozytywny element badań Doktoranta należy podkreślić zastosowanie chromatografii gazowej w układzie z selektywnym detektorem wychwyty elektronów (GC/ECD). Umożliwiło to wykrywanie zanieczyszczeń na poziomie nanogramów. Możliwe było wówczas porównanie układu (GC/ECD) z wynikami w układzie chromatograf gazowy – spektrometr mas (GC/MS). Rezultatem tych badań była informacja, że detektor ECD może być czulszy w oznaczaniu aldehydów niż powszechnie stosowany MS. Doktorant zaprojektował przygotowaną do wdrożenia aparaturę, umożliwiającą pobór i analizę próbek zawierających lotne związki organiczne w specyficznych środowiskach, zwłaszcza w trudno dostępnych. Zbudował zaawansowany system monitorowania zanieczyszczeń powietrza, który mógł współpracować z BSP, który jest b. lekki i stanowi sprzęt pomiarowy umieszczony na BSP. Tym samym może być aplikowany w mało dostępnych obszarach. Zdecydowanym osiągnięciem badawczym i technicznym Doktoranta jest integracja bezzałogowego statku powietrznego, zarówno ze zautomatyzowaną aparaturą do bezpośrednich pomiarów (on-line) jak i z aparaturą pobierającą próbki do ich późniejszej, precyzyjnej analizy (off-line) w warunkach laboratoryjnych. Dzięki precyzyjnym analizom laboratoryjnym jest możliwa precyzyjna ocena błędów czujników wykorzystywanych do pomiarów bezpośrednich i w efekcie ich kalibracja przy kolejnych pomiarach. Zaprojektowana aparatura jest przedmiotem dwóch zgłoszeń patentowych. Reasumując należy podkreślić, że Doktorant zidentyfikował stężenie formaldehydu w próbkach pochodzących z różnych źródeł. Wykazał, że również w materiałach biodegradowalnych, zalecanych przez Unię Europejską jako zamienniki wycofywanego plastiku do pakowania żywności, niepożądane związki mogą migrować do środowiska i stanowić nowe niebezpieczne źródło zanieczyszczeń. Wykazał również że przy podgrzewaniu papierowych naczyń jednorazowych może nastąpić emisja formaldehydu o stężeniu przekraczającym czterokrotnie dozwolony jednorazowy poziom stężenia w powietrzu o wartości  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Informacje zawarte w recenzowanej rozprawie świadczą o dostatecznej wiedzy Doktoranta niezbędnej do realizacji celów i zakresu badań. Charakteryzują się dobrym przygotowaniem z zakresu nauk ścisłych o charakterze szczegółowym odpowiadającym obszarowi prowadzonych badań naukowych. Świadczy o tym obszerny przegląd specjalistycznej literatury naukowej, reprezentującej chemię, elektronikę i automatykę oraz podstawy budowy bezzałogowych statków powietrznych wykorzystywanych dotychczas w celach wojskowych oraz teledetekcji stosowanej przy ocenie problematyki inżynierii i ochrony środowiska. Doktorant przeprowadził wnikliwą analizę zagadnień prawnych w tym zakresie dotyczących problematyki krajowej i światowej ze szczególnym uwzględnieniem aktów prawnych Unii Europejskiej. Zwrócił szczególną uwagę na aspekty ochrony środowiska i czynników mogących zakłócać zdrowie człowieka. Oparł te informacje przy okazji analizy metodyk stosowanych do badania mikrozanieczyszczeń w środowisku naturalnym. Korzystając z możliwości współpracy z Wydziałem Automatyki, Robotyki i Elektrotechniki na Politechnice Poznańskiej, realizując projekt w ramach Inkubatora Innowacyjności 4.0 dokonał w latach 2020 - 2022 dwa zgłoszenia patentowe (jako współautor) na temat urządzeń do pomiaru



czystości powietrza oraz kalibracji niskokosztowych czujników jakości powietrza. Doświadczenie w tym zakresie pozwoliło na pogłębienie wiedzy technicznej i praktycznej Doktoranta. W świetle niepodważalnych osiągnięć naukowych i technicznych Doktoranta oraz całokształtu unikalnych wyników badań z wykorzystaniem bezzałogowych statków powietrznych oraz ich interpretacji stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Michała Adamskiego zasługuje na wyróżnienie. Załączam też uzasadnienie mojego wniosku.

Nieliczne uwagi i pytania znajdują się w części tekstowej recenzji. Tym niemniej na obronie rozprawy doktorskiej proszę o b. precyzyjne wyjaśnienie

- czy obroty śmigieł BSP rzeczywiście nie zakłócały możliwości pobierania próbek powietrza do analizy.
- wzór o-(2,3,4,5-pentafluorobenzyl)hydroksylaminy) · HCl, czy to jest chlorowodorek ww. związku
- drobne literówki zaznaczyłem w tekście rozprawy. Nie rzutują one na końcową ocenę pracy. Tym niemniej mogą być pomocne przy redagowaniu kolejnych prac naukowych Doktoranta

#### **4. Wniosek końcowy**

Podsumowując stwierdzam że, recenzowana rozprawa, spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim, określone w *art. 187, Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*. Tym samym wnioskuję do Rady Naukowej Dyscypliny Nauki Chemiczne Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu o dopuszczenie mgr. inż. Michała Adamskiego do dalszego postępowania kwalifikacyjnego, przewidzianego w procedurze do uzyskania stopnia naukowego doktora nauk chemicznych. Zamieszczam również wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej na Wydziale Chemii UAM.

**Wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Michała Adamskiego  
na Wydziale Chemii UAM.**

Dorobek Doktoranta charakteryzuje się szczególnymi osiągnięciami naukowymi i praktycznymi. Ocena ta wynika z opracowania oryginalnej metody analizy próbek środowiskowych, tak zaprojektowanej aby możliwa była współpraca układów elektronicznych z bezzałogowym statkiem powietrznym (BSP). W tym przypadku praca badawcza Doktoranta dotyczy wybranej grupy związków karbonylowych, charakteryzujących się wysoką polarnością i labilnością. W szczególności badania skupione były na oznaczaniu aldehydów, jako markerów, głównie formaldehydu oraz acetaldehydu. Stanowią one znaczącą grupę mikrozanieczyszczeń występujących w środowisku. Źródłem tych zanieczyszczeń mogą być m.in. produkty z procesów termicznych i biodegradacji materiałów roślinnych, ulegających biodegradacji, jak również dezynfekcji. Uwalniane do środowiska, obecne są w atmosferze jako uboczne produkty procesów oksydacyjnych roślin. Należy podkreślić, że celem badań Doktoranta było zoptymalizowanie technik analitycznych oraz potwierdzenie efektywności opracowanej metody analitycznej. W tym przypadku Doktorant wykorzystał praktyczne i nowoczesne metody analityczne służące do oznaczania aldehydów, stosując w pierwszym etapie derywatazację próbek. Dobór metodyki badawczej był bardzo skuteczny, mając na uwadze związek *o*-(2,3,4,5,6-pentafluorobenzyl)hydroksylaminę (PFBOA) tworzący z aldehydami oksymy. Umożliwiło to prowadzenie ekstrakcji aldehydów z matrycy i wykorzystanie w analizie chromatograficznej. Ze względu na obecność fluoru, możliwe było stosowanie czułego, selektywnego detektora wychwytu elektronów. Doktorant uwzględnił przy tym oznaczeniu optymalne warunki procesu deprywatyzacji.

Doktorant opracował specjalne techniki ekstrakcyjne, umożliwiające identyfikację aldehydów alifatycznych występujących w śladowych (b.niskich) stężeniach. W przypadku technik ekstrakcyjnych w układzie ciecz – ciecz – (LLE) zostały dobrane warunki procesu umożliwiające rozdzielenie ekstrahenta i przygotowanie do analizy chromatograficznej. W zakresie techniki dyspersyjnej mikroekstrakcji ciecz–ciecz stosowano wspomaganie flotacją zamrożonej kropli organicznej (DLLME–SFO) i w tym przypadku stosowano cykloheksan jako ekstrahent oraz dodatkowo używano metanolu, jako rozpuszczalnika dyspergującego. Dobrano/zoptymalizowano w tym przypadku objętości rozpuszczalników: cykloheksanu i metanolu. Tym samym zminimalizowano ilości substancji chemicznych, zgodnie z założeniami „Zielonej chemii”.

*H. Szym*