

MOŻLIWOŚĆ ZASTOSOWANIA NOWOCZESNYCH METOD ZAPOBIEGANIA SKUTKOM ZANIECZYSZCZENIA POWIETRZA W OBSZARZE WSPARCIA

Metodyka

Niniejsze opracowanie powstało w oparciu o dostępne materiały dotyczące najnowszych metod monitoringu powietrza oraz sposobów eliminacji zanieczyszczeń. Przeanalizowano także dostępne materiały Uniwersytetu Śląskiego i Uniwersytetu w Żylinie na temat ochrony jakości powietrza w celu przedstawienia metod opartych na wynalazkach, patentach oraz know-how powstałych na tych uczelniach.

Według założenia, analiza powinna zawierać opis nowoczesnych metod monitoringu jakości powietrza i sposobów eliminacji zanieczyszczeń wedle schematu:

- 1) opis techniczny analizowanej metody monitoringu jakości powietrza oraz sposobach eliminacji szkodliwej emisji zanieczyszczeń do atmosfery wraz założeniami teoretycznymi,
- 2) opis wad i zalet każdej metody,
- 3) ocenę przydatności zastosowania poszczególnych metod,
- 4) korzyści płynące z zastosowania nowatorskich metod monitoringu jakości powietrza oraz sposobach eliminacji szkodliwej emisji zanieczyszczeń do atmosfery w stosunku do rozwiązań konwencjonalnymi stosowanymi przez samorządy terytorialne działające na terenie obszaru wsparcia.

Przy wyszukiwaniu najnowszych technik pomiaru i sposobów eliminacji zanieczyszczeń powietrza stosowanych poza projektem wsparcia użyto poniższych słów kluczowych w różnych kombinacjach:

air AND pollution/quality AND monitoring/measurement/control;

air pollution reduction; air quality improvement

Ponadto zastosowano odpowiednie filtry w celu selekcji jak najnowszych wyników badań przy użyciu wyszukiwarki publikacji naukowych Google Scholar.

Opisywany obszar wsparcia projektu zalicza się do regionów Europy o wysokim stopniu zanieczyszczenia powietrza. W ostatnim czasie zwiększa się też świadomość społeczna na temat jakości powietrza, a także wprowadzanych jest wiele regulacji prawnych traktujących o ochronie środowiska. Z tych powodów podejmowanych jest wiele pionierskich działań w zakresie monitoringu i ochrony jakości powietrza. W literaturze są one wymieniane jako innowacyjne metody, jednak w Polsce i na Słowacji w wielu miejscowościach zostały

wdrożone i planowane są kolejne projekty zastosowania nowoczesnych metod monitoringu i redukcji emisji zanieczyszczeń powietrza. Należą do nich nowoczesne metody pomiarowe, które charakteryzują się wysoką czułością, automatyzacją oraz możliwością pracy w czasie rzeczywistym. Jedną z kluczowych technik jest spektroskopia w podczerwieni z transformacją Fouriera (FTIR), pozwalająca na równoczesną analizę wielu gazów w powietrzu poprzez identyfikację ich charakterystycznych pasm absorpcji. Równie zaawansowaną metodą jest spektroskopia absorpcji UV-VIS oraz techniki DOAS (*Differential Optical Absorption Spectroscopy*), które umożliwiają pomiar stężeń gazów śladowych na dużych odległościach. W pomiarach pyłów zawieszonych PM₁₀ i PM_{2.5} coraz częściej wykorzystuje się czujniki optyczne oparte na zjawisku rozpraszania światła laserowego. Do monitorowania lotnych związków organicznych (LZO) stosuje się chromatografię gazową sprzężoną ze spektrometrią mas (GC-MS) oraz analizatory NDIR do pomiaru gazów cieplarnianych, takich jak CO₂ i CH₄. Rozwój technologii satelitarnych (np. Sentinel-5P, TROPOMI) umożliwia z kolei obserwację jakości powietrza w skali globalnej. Coraz większe znaczenie mają także czujniki niskokosztowe (LCS) zintegrowane z systemami IoT, które zapewniają wysoką rozdzielczość przestrzenną danych i ułatwiają tworzenie gęstych sieci pomiarowych wspierających lokalny monitoring środowiska.

1. Monitoring jakości powietrza przy wykorzystaniu Uniwersyteckich Laboratoriów Kontroli Atmosfery (ULKA) Uniwersytetu Śląskiego

a) Opis techniczny

Misją centrum badawczego ULKA jest prowadzenie badań nad zanieczyszczeniami powietrza, ich rozprzestrzenianiem się i wpływem jakości powietrza na zdrowie człowieka i środowisko. Centrum wyposażone jest nowoczesny sprzęt pomiarowy. Ma ono charakter interdyscyplinarny, a prowadzone badania obejmują zagadnienia z zakresu fizyki, chemii, biologii, meteorologii, klimatologii, geochemii i hydrologii. Na Uniwersytecie Śląskim powstało pierwsze w Polsce centrum badawcze w unikatowej formie, w którym zintegrowano kilka rodzajów laboratoriów:

- Napowietrzne Mobilne Laboratorium z aparaturą pomiarową znajdującą się w koszu załogowego balonu na ogrzane powietrze, zbierającą dane o zanieczyszczeniach powietrza. Balon wznosi się na wysokość 4 km i krąży nad aglomeracją śląską, a z jej obszaru pozyskuje dane o jakości powietrza oraz kierunku rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń. Pomimo coraz częstszego użycia dronów badających jakość powietrza, kosz balonu jest w stanie pomieścić bardziej specjalistyczną aparaturę wraz z obsługującą załogą. Urządzenia wchodzące w jej skład umożliwiają pomiar stężenia sadzy i ozonu, pyłów PM10, PM 2,5, CO₂, SO₂, NO, NO₂, NH₃, lotnych związków organicznych, formaldehydu i nanocząstek (w zakresie 10-300 nm). Analizatory gazów funkcjonują w oparciu o metodę wykorzystującą zjawisko absorpcji promienia ultrafioletowego cząsteczek poszczególnych gazów. W balonowym laboratorium działa też aspirator wysokoprzepływowo (2,5 m³ na minutę) umożliwiający badanie składu pyłów. Kontrolowane są również pyłki roślin, zarodniki grzybów oraz różne składniki mikrobiologiczne. Możliwe jest także wskazanie źródła analizowanych zanieczyszczeń. Ponadto w balonie umieszczona jest też stacja meteorologiczna gromadząca dane nt. temperatury, ciśnienia i wilgotności, kierunku i prędkości wiatru. Lot trwa od 1 do 3 godzin, a analizy prowadzone są w cyklach co 4 sekundy. GPS rejestruje trasę i wysokość przelotu, które są następnie analizowane przez geografów. Dane te służą do opracowania mapy zanieczyszczeń, wykrycia ich źródeł i ustalenia okoliczności, przy których może nastąpić ich kumulacja.
- terenowego mobilnego laboratorium – z aparaturą pomiarową zamontowaną w samochodzie, kompatybilną ze sprzętem w balonie,
- stacjonarnymi laboratoriami badawczymi będącymi na wyposażeniu różnych jednostek UŚ, w których analizowane są próby pobrane z terenu.

W wybranych powiatach obszaru wsparcia możliwe jest przeprowadzenie badań pozwalających na kompleksową ocenę poziomu zanieczyszczenia powietrza w wybranych lokalizacjach.

b) Wady i zalety monitoringu jakości powietrza przy wykorzystaniu Uniwersyteckich Laboratoriów Kontroli Atmosfery (ULKA)

Do zalet tej metody należy możliwość poboru prób powietrza z dużej wysokości (do 4 km nad powierzchnią) i przez długi czas (do 3 godzin). Użytkowanie balonu nie powoduje wysokich kosztów eksploatacyjnych. Pomiar nie są zakłócane przez hałas czy drgania, ponieważ balon nie posiada napędu, a jego poziomy ruch jest zgodny z ruchem powietrza. Dzięki temu pobór próbek odbywa się w strefach, do których nie dotarły żadne urządzenia mechaniczne. Powoduje to z kolei ograniczoną możliwość kontroli nad trajektorią lotu, a przygotowanie do lotu jest też czasochłonne.

c) Korzyści płynące z zastosowania nowatorskiej metody monitoringu jakości powietrza

Dzięki zintegrowaniu trzech rodzajów laboratoriów (w tym dwóch mobilnych) i pracy ekspertów różnych specjalności, zbierane i analizowane są kompleksowe dane, w wyniku czego dostarczany jest pełny obraz na temat jakości powietrza z obszaru o dużym stopniu urbanizacji i industrializacji, jakim jest aglomeracja Śląska. Analizy pozwalają na określenie stężeń i poznanie kierunku przemieszczania się zanieczyszczeń w układzie przestrzennym w bardzo szerokim zakresie. Wyniki badań prowadzonych przez tę jednostkę przyczynią się do możliwości podjęcia działań w kierunku ochrony środowiska i zdrowia publicznego na terenie aglomeracji śląskiej i w okolicznych regionach.



Ryc. 1. Balon Uniwersyteckich Laboratoriów Kontroli Atmosfery Uniwersytetu Śląskiego (źródło: <https://us.edu.pl/nauka-i-badania/centra-badawcze/ulka/ulka-laboratoria/>).



Ryc. 2. Analizator ozonu POM 2B Technology – jedno z urządzeń działających na pokładzie mobilnych laboratoriów (źródło: <https://us.edu.pl/nauka-i-badania/centra-badawcze/ulka/ulka-aparatura/>).

2. Monitoring jakości powietrza przy zastosowaniu metody FTIR (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy*)

a) Opis techniczny

FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) to spektroskopia w podczerwieni z transformacją Fouriera, która polega na analizie promieniowania podczerwonego (IR) pochłanianego przez cząsteczki gazów w badanej próbce. Istota tej metody opiera się na fakcie, że każdy związek chemiczny ma charakterystyczne pasma absorpcyjne w podczerwieni, wynikające z drgań jego wiązań chemicznych. Dzięki temu FTIR umożliwia jednoczesne wykrywanie i ilościowe oznaczanie wielu zanieczyszczeń w powietrzu.

Celem zastosowania metody FTIR jest więc identyfikacja i ilościowe oznaczanie związków chemicznych w fazie gazowej, a w szczególności monitorowanie zanieczyszczeń powietrza w sposób szybki, dokładny i nieinwazyjny. Metoda ta umożliwia jednoczesne oznaczanie wielu składników mieszaniny gazowej i znajduje zastosowanie w kontroli emisji przemysłowych, badaniach środowiskowych, analizie spalin, ocenie jakości powietrza oraz w monitorowaniu procesów technologicznych.

Podstawą metody FTIR jest zjawisko absorpcji promieniowania podczerwonego przez cząsteczki gazów. Promieniowanie w zakresie średniej podczerwieni ($4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$) przechodząc przez badaną próbkę, jest pochłaniane przez drgania charakterystycznych wiązań chemicznych w cząsteczkach. Każdy związek posiada unikalny zestaw częstotliwości drgań, dzięki czemu jego widmo absorpcyjne stanowi swoisty wskaźnik występowania (tzw. *fingerprint*) danej substancji.

Zasadniczym elementem stosowanym w metodzie FTIR jest interferometr Michelsona, który rozdziela promieniowanie z szerokopasmowego źródła, jakim najczęściej jest globar lub laser He–Ne, na dwie wiązki. Jedna odbija się od zwierciadła stałego, a druga od zwierciadła ruchomego. Po ponownym połączeniu obie wiązki interferują, tworząc interferogram — sygnał zależny od różnicy dróg optycznych. Interferogram zawiera informacje o wszystkich długościach fal jednocześnie, dzięki czemu pomiar jest szybki i efektywny. Następnie komputer przetwarza zarejestrowany sygnał za pomocą transformacji Fouriera, przekształcając go w widmo absorpcyjne przedstawiające zależność intensywności absorpcji od liczby falowej. Porównując uzyskane widmo z bibliotekami referencyjnymi (np. HITRAN, PNNL), można jednoznacznie zidentyfikować składniki próbki i określić ich stężenia.

Do badań powietrza atmosferycznego stosuje się często tzw. *multi-pass cells*, które zwiększają efektywną długość drogi optycznej nawet do kilkudziesięciu metrów, co pozwala

wykrywać bardzo niskie stężenia związków – rzędu części na miliard (ppb). W przypadku badań powietrza atmosferycznego często analizowane są między innymi: dwutlenek węgla (CO₂), tlenek węgla (CO), tlenki azotu (NO, NO₂), dwutlenek siarki (SO₂), amoniak (NH₃), metan (CH₄), tlenek diazotu (N₂O), chlorowodór (HCl), fluorowodór (HF) czy różne lotne związki organiczne (VOC).

Pomiary FTIR mogą być prowadzone *in situ*, bezpośrednio w strumieniu gazu (np. w przewodzie spalinowym), lub *ex situ*, po pobraniu próbki do komory pomiarowej. W celu wykonania pomiarów *in situ* emitowanych zanieczyszczeń atmosferycznych należy wykonać następujące kroki:

- sprawdzenie aparatury (min. spektrometr FTIR (interferometr), detektor (np. MCT dla wyższej czułości lub DTGS), przygotowanie gazu zerowego (suchy N₂ lub powietrze oczyszczone) i wzorcowego gazu kalibracyjnego,
- wybrać punkt pomiarowy reprezentatywny dla badanego procesu (np. środek przekroju przewodu, zgodnie z wymaganiami pomiarów emisji),
- zamontować aparaturę tak, aby wiązka IR przebiegała przez strumień gazu; w przypadku procedur *open-path* ustalić odpowiednią odległość i osłony przeciwwiatrowe, jeżeli to konieczne, zainstalować podgrzewany sonda/próbnik aby uniknąć kondensacji i adsorpcji,
- uruchomić spektrometr i detektor, uruchomić pompę i ustalić przepływ, odczekać do stabilizacji sygnału, zastosować gaz zerowy do osiągnięcia stabilnego sygnału tła, zarejestrować widmo tła przy tych samych parametrach, które będą użyte do pomiaru (min. zakres liczby falowej, rozdzielczość spektralna, liczba skanów do uśrednienia),
- wykonać pomiary właściwe po włączeniu przepływu gazu procesowego, monitorować stabilność przepływu, temperatury i ciśnienia, zarejestrować serię widm (seria powtórzeń w celu sprawdzenia stabilności i odchylenia standardowego),
- zapisać wszystkie surowe interferogramy i przetworzone widma wraz z metadanymi: data/godzina, lokalizacja, parametry instrumentu, temperatura, ciśnienie, przepływ,
- przeprowadzić transformację Fouriera, *baseline correction* i kompensację absorbancji H₂O / CO₂ (jeżeli konieczne) lub użyć algorytmów wielokomponentowego dopasowania (*least-squares fitting*) z bibliotekami referencyjnymi (HITRAN/PNNL lub biblioteki producenta),
- wyznaczyć stężenia za pomocą prawa Lamberta-Beer’a, oszacować niepewność wyników

b) Wady i zalety monitoringu jakości powietrza przy wykorzystaniu metody FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)

Metoda FTIR posiada szereg zalet, które czynią ją jedną z najbardziej nowoczesnych i uniwersalnych technik w badaniu zanieczyszczeń powietrza. Jej najważniejszą zaletą jest możliwość jednoczesnego oznaczania wielu składników gazowych w jednej analizie, co znacząco skraca czas pomiaru i pozwala na kompleksową ocenę składu powietrza. Stanowi to istotną przewagę nad klasycznymi technikami chemicznymi, które wymagają oddzielnych analiz dla każdego związku.

Technika FTIR jest nieinwazyjna i bezreagentowa, nie wymaga przygotowania próbki ani stosowania odczynników chemicznych. Znacząco skraca to czas analizy i redukuje bieżące koszty eksploatacji. Pomiaru mogą być wykonywane w sposób ciągły, co pozwala na monitorowanie emisji w czasie rzeczywistym. Dane z pomiarów FTIR mogą być również przesyłane do baz danych w czasie rzeczywistym i wykorzystywane do modelowania zanieczyszczeń atmosferycznych oraz oceny zgodności emisji z obowiązującymi normami. Umożliwia to szybkie reagowanie na przekroczenia norm. Metoda charakteryzuje się również wysoką czułością i selektywnością, dzięki czemu pozwala wykrywać nawet śladowe ilości gazów (rzędu ppb). Dodatkowym atutem w badaniach zanieczyszczenia powietrza jest możliwość pracy zarówno w trybie laboratoryjnym, jak i w terenie (wariant in situ).

Do głównych wad FTIR należy wysoki koszt aparatury oraz konieczność specjalistycznej obsługi i regularnej kalibracji. Wyniki mogą być zakłócone przez obecność pary wodnej lub dwutlenku węgla, które silnie absorbują promieniowanie IR. Sprzęt wymaga także stabilnych warunków termicznych i czystej optyki.

c) Ocena przydatności zastosowania nowoczesnej metody monitoringu jakości powietrza

Pomimo opisanych ograniczeń związanych z kosztami i dostępem do wiedzy eksperckiej FTIR pozostaje jedną z najbardziej zaawansowanych metod analizy gazowych zanieczyszczeń powietrza, łącząc precyzję, szybkość i szeroki zakres zastosowań. Ze względu na swoją wysoką czułość, selektywność i zdolność do jednoczesnego pomiaru wielu składników, metoda FTIR stanowi obecnie jedno z najbardziej zaawansowanych narzędzi technicznych w dziedzinie monitoringu jakości powietrza i emisji przemysłowych. Pomimo stosunkowo wysokich kosztów aparatury, jej wszechstronność, szybkość i dokładność sprawiają, że FTIR jest szeroko stosowany w laboratoriach badawczych, stacjach monitoringu środowiskowego oraz w nowoczesnych instalacjach przemysłowych.

Należy jednak podkreślić, że zakres działania metody obejmuje zanieczyszczenia gazowe, a nie uwzględnia istotnych dla środowiska i zdrowia ludzi zanieczyszczeń cząstkami stałymi (PM). FTIR opiera się na absorpcji promieniowania podczerwonego przez cząsteczki gazów. Zasada działania polega na analizie drgań i rotacji wiązań chemicznych w cząsteczkach znajdujących się w stanie gazowym. Cząstki stałe (PM) natomiast nie są jednorodnymi cząsteczkami gazu, nie mają dobrze zdefiniowanych pasm absorpcyjnych w zakresie IR, powodują raczej rozpraszanie (*scattering*) i pochłanianie nieselektywne światła IR, co zakłóca pomiar gazów, ale nie daje informacji o składzie lub stężeniu pyłu. W efekcie FTIR może wykazywać wpływ cząstek na osłabienie wiązki, ale nie może określić ilości PM w jednostkach masowych ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). FTIR może pośrednio zidentyfikować skład chemiczny frakcji gazowej pochodzącej z procesów generujących pył (np. spalanie, emisje przemysłowe) oraz przy spełnieniu specyficznych warunków badać osady lub próbki pyłu po ekstrakcji. W takich przypadkach jednak FTIR służy nie do pomiaru ilości PM w powietrzu, ale do analizy składu chemicznego cząstek już zebranych (np. zawartość sadzy, siarczanów, węglowodorów).



Ryc. 3. Thermo Nicolet – przykład laboratoryjnego spektrometru FTIR (źródło: <https://mrl.illinois.edu/facilities/equipment/thermo-nicolet-nexus-is50-ftir>)

3. Monitoring jakości powietrza przy zastosowaniu czujników niskokosztowych LCS

a) Opis techniczny

Celem stosowania czujników niskokosztowych (*low-cost sensors*, LCS) w monitoringu jakości powietrza jest rozszerzenie przestrzennego zasięgu pomiarów przy znacznym obniżeniu kosztów w porównaniu do stacji referencyjnych. Ich podstawową funkcją jest ciągłe rejestrowanie, w czasie rzeczywistym danych o stężeniach kluczowych zanieczyszczeń atmosferycznych, takich jak pyły zawieszone PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁, a także gazy – NO₂, CO, SO₂, O₃ czy lotne związki organiczne (LZO). Zastosowanie LCS pozwala na uzyskanie danych o dużej rozdzielczości przestrzennej i czasowej, co jest szczególnie istotne w analizie zjawisk smogowych i emisji lokalnych w obszarach miejskich.

Zasada działania czujników niskokosztowych zależy od zastosowanego typu sensora. Wyróżnia się kilka głównych kategorii technologicznych, w tym: czujniki elektrochemiczne, półprzewodnikowe, optyczne laserowe oraz NDIR. Czujniki elektrochemiczne mierzą stężenie gazów na podstawie reakcji elektrochemicznych zachodzących między elektrodą a cząsteczkami gazu. Przepływ prądu generowany podczas reakcji jest proporcjonalny do stężenia analizowanego gazu. Czujniki półprzewodnikowe (MOS, *Metal Oxide Semiconductor*) – działają na zasadzie zmiany przewodnictwa elektrycznego warstwy tlenku metalu po kontakcie z określonym gazem. Stosowane są głównie do pomiarów LZO oraz CO. Czujniki optyczne laserowe wykorzystują zjawisko rozpraszania światła (*light scattering*) do detekcji pyłów zawieszonych PM. Ilość i intensywność rozproszonego światła koreluje z masą i rozmiarem cząstek aerozolu. Czujniki NDIR (Non-Dispersive Infrared) wykorzystują absorpcję promieniowania podczerwonego przez molekuły gazu, np. CO₂ lub CH₄, umożliwiając pomiar ich stężenia na podstawie spadku intensywności wiązki IR.

W przypadku wszystkich typów czujników dane pomiarowe są cyfryzowane i przesyłane w czasie rzeczywistym do systemu przetwarzania danych (np. chmury obliczeniowej) z użyciem modułów komunikacyjnych takich jak Wi-Fi czy GSM. Tam podlegają dalszej analizie, kalibracji i wizualizacji.

Czujniki niskokosztowe są wykorzystywane do ciągłego monitoringu środowiska na poziomie lokalnym i regionalnym. Ze względu na niską masę i niewielkie wymagania energetyczne, mogą być montowane na latarniach ulicznych, fasadach budynków, pojazdach lub dronach. Dane z wielu czujników tworzą gęstą sieć pomiarową, pozwalającą na precyzyjne mapowanie stężeń zanieczyszczeń w skali mikro. Zastosowanie czujników LCS obejmuje m.in.: wspieranie systemów wczesnego ostrzegania przed smogiem, identyfikację źródeł

emisji, kalibrację modeli dyspersji zanieczyszczeń oraz działania edukacyjne i partycypacyjne społeczeństwa. Pomimo mniejszej dokładności w porównaniu z urządzeniami referencyjnymi, czujniki niskokosztowe po odpowiedniej kalibracji, np. z użyciem metod uczenia maszynowego, zapewniają wystarczającą jakość danych dla celów analitycznych i decyzyjnych.

b) Wady i zalety monitoringu jakości powietrza przy wykorzystaniu czujników niskokosztowych LCS

Główną zaletą czujników LCS jest możliwość prowadzenia pomiarów o dużej rozdzielczości przestrzennej i czasowej przy relatywnie niskich kosztach instalacji i utrzymania. Urządzenia te są kompaktowe, energooszczędne i mobilne, co umożliwia ich instalację w różnych lokalizacjach – na budynkach, latarniach, pojazdach czy dronach. Dane z czujników są przekazywane w czasie rzeczywistym, co pozwala na szybkie wykrywanie lokalnych źródeł emisji i wspiera działania prewencyjne. Dzięki temu LCS stanowią ważny element systemów inteligentnego monitoringu środowiska oraz inicjatyw obywatelskich (*citizen science*), zwiększających świadomość ekologiczną społeczeństwa.

Do głównych wad czujników niskokosztowych należy niższa dokładność w porównaniu do metod referencyjnych oraz wrażliwość na czynniki środowiskowe, takie jak temperatura, wilgotność i ciśnienie. Wymagają one częstej kalibracji i walidacji w odniesieniu do stacji referencyjnych, aby zapewnić wiarygodność wyników. Pomimo tych ograniczeń, po odpowiednim skalibrowaniu czujniki LCS są cennym uzupełnieniem tradycyjnych systemów monitoringu, oferując dane w skali mikro i umożliwiając lepsze zrozumienie zjawisk smogowych.

c) Ocena przydatności zastosowania nowoczesnej metody monitoringu jakości powietrza

Czujniki niskokosztowe stanowią ważny element nowoczesnych systemów monitoringu powietrza, umożliwiając efektywne kosztowo, gęste i zautomatyzowane pomiary środowiskowe. Dzięki połączeniu z technologiami IoT, bazami danych i algorytmami analitycznymi tworzą podstawę dla inteligentnych systemów zarządzania jakością powietrza. Wspierają zarówno administrację publiczną, jak i obywateli, w podejmowaniu działań na rzecz poprawy stanu środowiska i zdrowia publicznego. Czujniki niskokosztowe umożliwiają monitorowanie zanieczyszczeń powietrza przy znacznie niższych kosztach niż klasyczne stacje referencyjne. W ostatnich latach ich rozwój stanowi kluczowy kierunek modernizacji systemów monitoringu środowiska, zarówno w miastach, jak i na terenach wiejskich. Wprowadzenie

czujników typu LCS do sieci monitoringu środowiska umożliwia demokratyzację dostępu do danych o jakości powietrza – pomiary mogą być prowadzone nie tylko przez instytucje publiczne czy jednostki naukowe, ale też samorządy lokalne oraz inicjatywy obywatelskie (w ramach np. *citizen science*).



Fig. 4. Przykład zamontowanego niskokosztowego sensora zanieczyszczenia powietrza (źródło: <https://grist.org/health/low-cost-sensors-are-helping-communities-find-gaps-in-air-quality-data/>).

4. Korzyści płynące z zastosowania nowatorskich metod monitoringu jakości powietrza oraz sposobach eliminacji szkodliwej emisji zanieczyszczeń do atmosfery w stosunku do rozwiązaniami konwencjonalnymi stosowanymi przez samorzady terytorialne działające na terenie obszaru wsparcia

Zainteresowanie rozwojem nowoczesnych systemów monitoringu jakości powietrza wzrasta w ostatnich latach, a wynika to z potrzeby bardziej precyzyjnego i dostępnego pomiaru zanieczyszczeń atmosferycznych. Tradycyjne rozwiązania stosowane przez samorzady terytorialne, oparte np. w Polsce głównie na stacjach referencyjnych Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska (GIOŚ), zapewniają bardzo wysoką dokładność, jednak ich liczba jest ograniczona ze względu na wysokie koszty inwestycyjne i eksploatacyjne (GIOŚ, 2022). W konsekwencji dane o jakości powietrza mają charakter punktowy i nie oddają w pełni zmienności przestrzennej stężeń zanieczyszczeń w skali lokalnej.

Nowoczesne metody, oparte na technologii niskokosztowych czujników (low-cost sensors), Internetu Rzeczy (IoT) oraz analizy danych w chmurze, umożliwiają tworzenie gęstych sieci pomiarowych o wysokiej rozdzielczości przestrzennej i czasowej (Karagulian et al., 2019). Dzięki możliwości transmisji danych w czasie rzeczywistym możliwe jest szybkie reagowanie na epizody smogowe, analiza trendów oraz identyfikacja źródeł emisji zanieczyszczeń. Systemy te są coraz częściej wspierane przez algorytmy uczenia maszynowego, które pozwalają na kalibrację tanich sensorów w oparciu o dane referencyjne, poprawiając ich dokładność (Spinelle et al., 2017).

Kolejnym atutem nowoczesnych rozwiązań jest ich mobilność i elastyczność. Czujniki mogą być instalowane na budynkach, pojazdach, dronach czy elementach infrastruktury miejskiej, co umożliwia monitoring miejsc dotychczas nieobjętych siecią pomiarową (Snyder et al., 2013). Integracja danych z naziemnych czujników, pomiarów satelitarnych (np. misja Sentinel-5P) oraz modeli numerycznych (CAMS, WRF-Chem) pozwala na tworzenie kompleksowych map jakości powietrza w skali regionalnej (ESA, 2018).

Zastosowanie nowoczesnych technologii monitoringu przynosi również korzyści społeczne i edukacyjne. Publiczny dostęp do aktualnych danych poprzez aplikacje mobilne i portale internetowe (np. Airly, Syngéos) zwiększa świadomość ekologiczną społeczeństwa oraz umożliwia mieszkańcom podejmowanie decyzji dotyczących aktywności na zewnątrz czy sposobu ogrzewania. Dla samorządów oznacza to skuteczniejsze planowanie polityki antysmogowej, kontrolę źródeł emisji oraz optymalizację działań prewencyjnych.

Podsumowując, nowoczesne systemy monitoringu jakości powietrza stanowią istotne uzupełnienie klasycznych metod referencyjnych. Dzięki często niższym kosztom, większej dostępności danych oraz możliwości ich integracji i analizy w czasie rzeczywistym, umożliwiają one bardziej efektywne zarządzanie jakością powietrza i poprawę zdrowia publicznego w Polsce.

Spis literatury

- ABB Analytical Measurement. (2020). FTIR Gas Analyzers – User Manual and Application Guide. Zurich, Switzerland: ABB Ltd.
- Air Liquide. (2019). FTIR Gas Analysis: Principles and Applications in Emission Control. Technical White Paper. Paris, France: Air Liquide.
- Castell, N., Dauge, F. R., Schneider, P., Vogt, M., Lerner, U., Fishbain, B., Broday, D., & Bartonova, A. (2017). Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates? *Environment International*, 99, 293–302. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.12.007>
- European Committee for Standardization. (2014). EN 15267 & EN 14181: Quality assurance of automated measuring systems for emission monitoring. Brussels: CEN.
- European Space Agency. (2018). Sentinel-5P: TROPOMI Instrument Performance Report. Noordwijk, Netherlands: ESA Publications.
- Główny Inspektorat Ochrony Środowiska. (2022). Stan jakości powietrza w Polsce – Raport roczny 2021. Warszawa: GIOŚ.
- Griffith, D. W. T. (1996). Synthetic calibration and quantitative analysis of gas-phase FTIR spectra. *Applied Spectroscopy*, 50(1), 59–70. <https://doi.org/10.1366/0003702963906627>
- Griffiths, P. R., & de Haseth, J. A. (2007). *Fourier Transform Infrared Spectrometry* (2nd ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Heland, J., Schäfer, K., Haus, R., & Platt, U. (2002). Determination of source strength and flux of air pollutants using open-path FTIR. *Atmospheric Environment*, 36(20), 3497–3508. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00286-5](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00286-5)
- Hollas, J. M. (2004). *Modern Spectroscopy* (4th ed.). Chichester, UK: John Wiley & Sons.
- Karagulian, F., Barbiere, M., Kotsev, A., Spinelle, L., Gerboles, M., Lagler, F., Redon, N., Crunaire, S., & Borowiak, A. (2019). Review of the performance of low-cost sensors for air quality monitoring. *Atmosphere*, 10(9), 506. <https://doi.org/10.3390/atmos10090506>
- Karagulian, F., Gerboles, M., Barbiere, M., Kotsev, A., Lagler, F., Borowiak, A., & Mazzuca, G. (2019). Review of sensors for air quality monitoring. *Atmospheric Environment*, 219, 117066. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117066>
- Mead, M. I., Popoola, O. A. M., Stewart, G. B., Landshoff, P., Calleja, M., Hayes, M., Baldovi, J. J., McLeod, M. W., Hodgson, T. F., Dicks, J., Lewis, A., Cohen, J., Baron, R., Saffell, J. R., & Jones, R. L. (2013). The use of electrochemical sensors for monitoring urban air

- quality in low-cost, high-density networks. *Atmospheric Environment*, 70, 186–203. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.11.060>
- Nakamoto, K. (2009). *Infrared and Raman Spectra of Inorganic and Coordination Compounds* (6th ed.). Hoboken, NJ: Wiley-Interscience.
- Pacific Northwest National Laboratory. (2020). *Infrared Spectral Database for Gas-Phase Molecules*. Richland, WA: PNNL. Retrieved from <https://secure3.pnl.gov/nsd/nsd.nsf>
- Rothman, L. S., Gordon, I. E., Barbe, A., Benner, D. C., Bernath, P. F., Birk, M., ... & Wagner, G. (2013). The HITRAN2012 molecular spectroscopic database. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 130, 4–50. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2013.07.002>
- Smith, B. C. (2011). *Fundamentals of Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (2nd ed.). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Snyder, E. G., Watkins, T. H., Solomon, P. A., Thoma, E. D., Williams, R. W., Hagler, G. S. W., ... & Preuss, P. W. (2013). The changing paradigm of air pollution monitoring. *Environmental Science & Technology*, 47(20), 11369–11377. <https://doi.org/10.1021/es4022602>
- Spinelle, L., Gerboles, M., Villani, M. G., Aleixandre, M., & Bonavitacola, F. (2017). Field calibration of a cluster of low-cost available sensors for air quality monitoring. *Sensors*, 17(10), 2420. <https://doi.org/10.3390/s17102420>
- Spinelle, L., Gerboles, M., Kok, G., Persijn, S., & Sauerwald, T. (2017). Review of portable and low-cost sensors for the ambient air monitoring of benzene and other volatile organic compounds. *Sensors*, 17(7), 1520. <https://doi.org/10.3390/s17071520>
- St. Louis, R., & Thompson, D. (2009). Air monitoring using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). *Environmental Monitoring Journal*, 11(3), 121–134.
- Thermo Fisher Scientific. (2021). *FTIR Gas Analysis Systems: Operation and Calibration Manual*. Waltham, MA: Thermo Fisher Scientific.
- Uniwersytet Śląski. Nauka i badania. Uniwersyteckie Laboratoria Kontroli Atmosfery. <https://us.edu.pl/nauka-i-badania/centra-badawcze/ulka/> (dostęp: 24.01.2025)
- Uniwersytet Śląski (2019) Patent, dzięki któremu będziemy oddychać czystszy powietrzem <https://us.edu.pl/patent-dzieki-ktoremu-bedziemy-oddychac-czystszym-powietrzem/> (dostęp: 24.01.2025)
- U.S. Environmental Protection Agency. (2017). *Measurement of Gaseous Emissions by Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy (Method 320)*. Washington, DC: EPA.

MOŽNOSŤ VYUŽITIA MODERNÝCH METÓD PREVENČIE NÁSLEDKOV ZNEČISTENIA OVZDUŠIA V OBLASTI PODPORY

Metodika

Toto spracovanie vzniklo na základe dostupných materiálov týkajúcich sa najnovších metód monitorovania ovzdušia a spôsobov eliminácie znečistenia. Analyzované boli aj materiály Univerzity Šľaska a Žilinskej univerzity zamerané na ochranu kvality ovzdušia, s cieľom predstaviť metódy založené na vynálezoch, patentoch a know-how vytvorených na týchto univerzitách. Podľa zadania má analýza obsahovať opis moderných metód monitorovania kvality ovzdušia a spôsobov eliminácie znečistenia podľa nasledujúcej schémy:

- 1) technický opis analyzovanej metódy monitorovania kvality ovzdušia a spôsobov eliminácie škodlivých emisií do atmosféry vrátane teoretických východísk,
- 2) opis výhod a nevýhod každej metódy,
- 3) posúdenie vhodnosti použitia jednotlivých metód,
- 4) prínosy vyplývajúce z využitia inovatívnych metód monitorovania kvality ovzdušia a eliminácie škodlivých emisií v porovnaní s konvenčnými riešeniami používanými miestnymi samosprávami v oblasti podpory.

Pri vyhľadávaní najnovších techník merania a spôsobov eliminácie znečistenia ovzdušia používaných mimo projektu podpory boli použité nasledujúce kľúčové slová v rôznych kombináciách:

air AND pollution/quality AND monitoring/measurement/control;
air pollution reduction; air quality improvement

Okrem toho boli použité vhodné filtre na výber najnovších výsledkov výskumu prostredníctvom vyhľadávača vedeckých publikácií Google Scholar.

Opisovaná oblasť podpory projektu patrí medzi regióny Európy s vysokou úrovňou znečistenia ovzdušia. V poslednom období sa zvyšuje aj spoločenské povedomie o kvalite ovzdušia a zavádza sa množstvo právnych regulácií týkajúcich sa ochrany životného prostredia. Z týchto dôvodov sa realizuje množstvo inovatívnych aktivít v oblasti monitorovania a ochrany kvality ovzdušia.

V odbornej literatúre sú tieto prístupy označované ako inovatívne metódy, pričom v Poľsku a na Slovensku už boli v mnohých mestách implementované a plánujú sa ďalšie projekty využívajúce moderné metódy monitorovania a znižovania emisií znečisťujúcich látok.

Patria sem moderné meracie metódy, ktoré sa vyznačujú vysokou citlivosťou, automatizáciou a schopnosťou pracovať v reálnom čase. Jednou z kľúčových techník je infračervená spektroskopia s Fourierovou transformáciou (FTIR), ktorá umožňuje súčasnú analýzu viacerých plynov v ovzduší na základe identifikácie ich charakteristických absorpčných pásiem.

Rovnako pokročilou metódou je UV-VIS absorpčná spektroskopia a techniky DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy), ktoré umožňujú meranie koncentrácií stopových plynov na veľké vzdialenosti.

Pri meraní suspendovaných častíc PM₁₀ a PM_{2.5} sa čoraz častejšie využívajú optické senzory založené na rozptyle laserového svetla. Na monitorovanie prchavých organických zlúčenín

(VOC) sa používa plynová chromatografia spojená s hmotnostnou spektrometriou (GC-MS), ako aj analyzátory NDIR na meranie skleníkových plynov, ako sú CO₂ a CH₄.

Rozvoj satelitných technológií (napr. Sentinel-5P, TROPOMI) umožňuje sledovanie kvality ovzdušia v globálnom meradle.

Stále väčší význam majú aj nízkonákladové senzory (LCS) integrované so systémami IoT, ktoré poskytujú vysoké priestorové rozlíšenie dát a umožňujú budovanie hustých meracích sietí podporujúcich lokálny environmentálny monitoring.

1. Monitorovanie kvality ovzdušia s využitím Univerzitných laboratórií kontroly atmosféry (ULKA) Univerzita Śląska

a) Technický opis

Poslaním výskumného centra ULKA je realizovať výskum znečistenia ovzdušia, jeho šírenia a vplyvu kvality ovzdušia na zdravie človeka a životné prostredie. Centrum je vybavené modernou meracou technikou a má interdisciplinárny charakter. Výskum zahŕňa oblasti fyziky, chémie, biológie, meteorológie, klimatológie, geochemie a hydrológie.

Na Univerzite Śląskej vzniklo prvé výskumné centrum v Poľsku v unikátnej forme, kde bolo integrovaných niekoľko typov laboratórií:

- **Vzdušné mobilné laboratórium** – meracia technika je umiestnená v koši pilotovaného teplovzdušného balóna, ktorý zhromažďuje údaje o znečistení ovzdušia. Balón vystupuje do výšky približne 4 km a pohybuje sa nad sliezkou aglomeráciou, pričom zbiera údaje o kvalite ovzdušia a smeroch šírenia znečistenia. Na rozdiel od dronov dokáže balón niesť pokročilejšie zariadenia spolu s obsluhou. Meracie prístroje umožňujú sledovať koncentrácie sadzí, ozónu, prachových častíc PM10 a PM2.5, CO₂, SO₂, NO, NO₂, NH₃, prchavých organických zlúčenín, formaldehydu a nanočastíc (10–300 nm). Analyzátory plynov fungujú na princípe absorpcie ultrafialového žiarenia jednotlivými plynmi. Súčasťou je aj vysokoprietokový aspirátor (2,5 m³/min), ktorý umožňuje analýzu zloženia prachových častíc. Monitorujú sa aj peľové zrná, spóry húb a mikrobiologické zložky. Systém umožňuje identifikovať zdroje znečistenia. Balón je vybavený aj meteorologickou stanicou, ktorá zaznamenáva teplotu, tlak, vlhkosť, smer a rýchlosť vetra. Let trvá 1 až 3 hodiny, pričom merania sa vykonávajú každé 4 sekundy. GPS zaznamenáva trasu a výšku letu, ktoré následne analyzujú geografovia. Údaje slúžia na tvorbu máp znečistenia, identifikáciu zdrojov a analýzu podmienok ich akumulácie.
- **Terénne mobilné laboratórium** – meracie zariadenia sú inštalované vo vozidle a sú kompatibilné so systémami používanými v balóne.
- **Stacionárne laboratóriá** – nachádzajú sa na rôznych pracoviskách univerzity a analyzujú vzorky odobraté v teréne.

Vo vybraných okresoch oblasti podpory je možné realizovať výskum umožňujúci komplexné hodnotenie úrovne znečistenia ovzdušia v konkrétnych lokalitách.

b) Výhody a nevýhody monitorovania kvality ovzdušia pomocou ULKA

Medzi hlavné výhody patrí možnosť odberu vzoriek vo veľkých výškach (do 4 km nad zemou) a počas dlhšieho času (až 3 hodiny). Prevádzka balóna nie je finančne náročná. Merania nie sú ovplyvnené hlukom ani vibráciami, keďže balón nemá vlastný pohon a jeho horizontálny pohyb je v súlade s prúdením vzduchu.

To umožňuje získavať vzorky z oblastí, kam sa mechanické zariadenia nedostanú. Nevýhodou je však obmedzená možnosť riadenia trajektórie letu a časovo náročná príprava letu.

c) Prínosy využitia inovatívnej metódy monitorovania kvality ovzdušia

Vďaka integrácii troch typov laboratórií (vrátane dvoch mobilných) a spolupráci odborníkov z rôznych disciplín sa zhromažďujú a analyzujú komplexné údaje. Výsledkom je detailný obraz kvality ovzdušia v silne urbanizovanej a industrializovanej oblasti, akou je sliezska aglomerácia.

Analýzy umožňujú presne určiť koncentrácie znečisťujúcich látok a sledovať ich pohyb v priestore vo veľmi širokom rozsahu. Výsledky výskumu tejto jednotky prispievajú k prijímaniu opatrení na ochranu životného prostredia a verejného zdravia v sliezskej regióne aj v okolitých oblastiach.



Obr. 1. Balón Univerzitných laboratórií kontroly atmosféry Univerzita Śląska (zdroj: <https://us.edu.pl/nauka-i-badania/centra-badawcze/ulka/ulka-laboratoria>)



Obr. 2. Ozónový analyzátor POM 2B Technology – jedno zo zariadení používaných na palube mobilných laboratórií (zdroj: <https://us.edu.pl/nauka-i-badania/centra-badawcze/ulka/ulka-aparatura/>).

2. Monitoring kvality ovzdušia pomocou metódy FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)

a) Technický opis

FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) je infračervená spektroskopia s Fourierovou transformáciou, ktorá spočíva v analýze infračerveného (IR) žiarenia absorbovaného molekulami plynov v skúmanej vzorke. Podstata tejto metódy vychádza zo skutočnosti, že každá chemická zlúčenina má charakteristické absorpčné pásma v infračervenej oblasti, vyplývajúce z vibrácií jej chemických väzieb. Vďaka tomu FTIR umožňuje súčasnú detekciu a kvantitatívne stanovenie viacerých znečisťujúcich látok v ovzduší.

Cieľom použitia metódy FTIR je identifikácia a kvantifikácia chemických zlúčenín v plynnej fáze, najmä monitorovanie znečistenia ovzdušia rýchlym, presným a neinvazívnym spôsobom. Metóda umožňuje súčasné stanovenie viacerých zložiek plynnej zmesi a nachádza uplatnenie pri kontrole priemyselných emisií, environmentálnych výskumoch, analýze spalín, hodnotení kvality ovzdušia a monitorovaní technologických procesov.

Základom metódy FTIR je jav absorpcie infračerveného žiarenia molekulami plynov. Žiarenie v oblasti stredného infračerveného spektra ($4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$) prechádzajúce skúmanou vzorkou je absorbované vibráciami charakteristických chemických väzieb. Každá zlúčenina má jedinečný súbor vibračných frekvencií, vďaka čomu jej absorpčné spektrum predstavuje špecifický „odtlačok prsta“ (fingerprint).

Kľúčovým prvkom FTIR je Michelsonov interferometer, ktorý rozdeľuje žiarenie zo širokopásmového zdroja (napr. globar alebo He–Ne laser) na dva lúče. Jeden sa odráža od pevného zrkadla, druhý od pohyblivého. Po opätovnom spojení dochádza k interferencii, čím vzniká interferogram – signál závislý od rozdielu optických dráh. Interferogram obsahuje

informácie o všetkých vlnových dĺžkach naraz, čo robí meranie rýchlym a efektívnym. Počítač následne spracuje signál pomocou Fourierovej transformácie a prevedie ho na absorpčné spektrum. Porovnaním so referenčnými databázami (napr. HITRAN, PNNL) možno presne identifikovať zložky vzorky a určiť ich koncentrácie.

Pri analýze atmosférického vzduchu sa často používajú tzv. multi-pass bunky, ktoré zvyšujú efektívnu optickú dráhu až na desiatky metrov, čo umožňuje detekciu veľmi nízkych koncentrácií (na úrovni ppb). Typicky analyzované látky zahŕňajú: CO₂, CO, NO, NO₂, SO₂, NH₃, CH₄, N₂O, HCl, HF a rôzne VOC.

Merania FTIR možno vykonávať **in situ** (priamo v prúde plynu) alebo **ex situ** (po odbere vzorky). Postup merania in situ zahŕňa:

- kontrolu prístrojov (FTIR spektrometer, detektor, nulový a kalibračný plyn),
- výber reprezentatívneho miesta merania,
- inštaláciu zariadenia tak, aby IR lúč prechádzal plynom,
- spustenie zariadenia a stabilizáciu signálu,
- zaznamenanie spektra pozadia,
- vykonanie merania a monitorovanie parametrov (teplota, tlak, prietok),
- uloženie interferogramov a spektrálnych dát s metadátami,
- spracovanie dát (Fourierova transformácia, korekcie, fitovanie),
- výpočet koncentrácií pomocou Lambertovho-Beerovho zákona a odhad neistoty.

b) Výhody a nevýhody metódy FTIR

Výhody:

- súčasná analýza viacerých plynov v jednej meracej operácii,
- rýchlosť a komplexnosť merania,
- neinvazívnosť a bezreagentovosť,
- možnosť kontinuálneho monitorovania v reálnom čase,
- vysoká citlivosť a selektivita (detekcia na úrovni ppb),
- možnosť využitia v laboratóriu aj v teréne,
- prenos dát a ich využitie v modelovaní a kontrole emisií.

Nevýhody:

- vysoké obstarávacie náklady,
- potreba odbornej obsluhy a kalibrácie,
- citlivosť na interferencie (H₂O, CO₂),
- požiadavky na stabilné podmienky a čistotu optiky.

c) Hodnotenie využiteľnosti metódy

Napriek obmedzeniam patrí FTIR medzi najmodernejšie metódy analýzy plynných znečisťujúcich látok. Kombinuje presnosť, rýchlosť a široké spektrum použitia, čo z nej robí jedno z najpokročilejších technických riešení v monitoringu kvality ovzdušia a priemyselných emisií. Je široko využívaná vo výskumných laboratóriách, monitorovacích staniciach aj v priemysle.

Treba však zdôrazniť, že metóda sa vzťahuje na **plynné znečistenie** a neumožňuje priamu analýzu tuhých častíc (PM). FTIR funguje na princípe absorpcie IR žiarenia molekulami plynov, zatiaľ čo pevné častice spôsobujú skôr rozptyl a neselektívnu absorpciu žiarenia. Preto FTIR nedokáže stanoviť koncentráciu PM v jednotkách hmotnosti ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Metóda môže nepriamo poskytnúť informácie o chemickom zložení plynov vznikajúcich pri procesoch generujúcich prach alebo analyzovať už odobraté vzorky častíc. V takých prípadoch však slúži na kvalitatívnu analýzu zloženia (napr. sadze, sírany, uhl'ovodíky), nie na kvantifikáciu prachových častíc v ovzduší.



Obr. 3. Thermo Nicolet – príklad laboratórneho FTIR spektrometra (zdroj: <https://mrl.illinois.edu/facilities/equipment/thermo-nicolet-nexus-is50-ftir>)

3. Monitoring kvality ovzdušia pomocou nízkonákladových senzorov (LCS)

a) Technický opis

Cieľom využívania nízkonákladových senzorov (low-cost sensors, LCS) v monitoringu kvality ovzdušia je rozšírenie priestorového pokrytia meraní pri výraznom znížení nákladov v porovnaní s referenčnými stanicami. Ich základnou funkciou je kontinuálne zaznamenávanie v reálnom čase údajov o koncentráciách kľúčových znečisťujúcich látok, ako sú suspendované častice PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁, ako aj plyny – NO₂, CO, SO₂, O₃ či prchavé organické zlúčeniny (VOC). Použitie LCS umožňuje získavať údaje s vysokým priestorovým a časovým rozlíšením, čo je obzvlášť dôležité pri analýze smogových javov a lokálnych emisií v mestských oblastiach. Princíp fungovania nízkonákladových senzorov závisí od použitej technológie. Rozlišuje sa niekoľko hlavných typov: elektrochemické, polovodičové, optické laserové a NDIR senzory.

- **Elektrochemické senzory** merajú koncentráciu plynov na základe elektrochemických reakcií medzi elektródou a molekulami plynu; generovaný prúd je úmerný koncentrácii plynu.
- **Polovodičové senzory (MOS)** fungujú na princípe zmeny elektrickej vodivosti vrstvy oxidu kovu po kontakte s plynom; používajú sa najmä na meranie VOC a CO.
- **Optické laserové senzory** využívajú rozptyl svetla (light scattering) na detekciu častíc PM; intenzita rozptylu koreluje s hmotnosťou a veľkosťou častíc.
- **NDIR senzory (Non-Dispersive Infrared)** využívajú absorpciu infračerveného žiarenia molekulami plynu (napr. CO₂ alebo CH₄) a merajú pokles intenzity IR lúča.

Vo všetkých prípadoch sú namerané údaje digitalizované a v reálnom čase prenášané do systému spracovania dát (napr. cloud) prostredníctvom komunikačných modulov ako Wi-Fi alebo GSM, kde sú ďalej analyzované, kalibrované a vizualizované.

Nízkonákladové senzory sa používajú na kontinuálny monitoring životného prostredia na lokálnej aj regionálnej úrovni. Vďaka malej hmotnosti a nízkej energetickej náročnosti môžu byť inštalované na pouličných lampách, fasádach budov, vozidlách alebo dronoch. Sieť takýchto senzorov umožňuje detailné mapovanie znečistenia v mikroškále. Ich využitie zahŕňa napríklad: systémy včasného varovania pred smogom, identifikáciu zdrojov emisií, kalibráciu modelov disperzie a vzdelávacie či participatívne aktivity verejnosti. Napriek nižšej presnosti v porovnaní s referenčnými zariadeniami môžu po vhodnej kalibrácii (napr. pomocou metód strojového učenia) poskytovať dostatočne kvalitné údaje pre analytické a rozhodovacie účely.

b) Výhody a nevýhody využitia LCS

Výhody:

- vysoké priestorové a časové rozlíšenie meraní,
- nízke náklady na inštaláciu a prevádzku,
- kompaktnosť, mobilita a nízka spotreba energie,
- možnosť inštalácie na rôznych miestach (budovy, lampy, vozidlá, drony),
- prenos dát v reálnom čase,
- podpora identifikácie lokálnych zdrojov znečistenia,
- významná úloha v inteligentných monitorovacích systémoch a citizen science,
- zvyšovanie environmentálneho povedomia verejnosti.

Nevýhody:

- nižšia presnosť oproti referenčným metódam,

- citlivosť na environmentálne faktory (teplota, vlhkosť, tlak),
- potreba častej kalibrácie a validácie,
- závislosť kvality údajov od správneho nastavenia a spracovania.

c) Hodnotenie využiteľnosti metódy

Nízkonákladové senzory predstavujú dôležitý prvok moderných systémov monitorovania ovzdušia, umožňujúci cenovo efektívne, husté a automatizované merania. V kombinácii s technológiami IoT, databázami a analytickými algoritmami tvoria základ inteligentného riadenia kvality ovzdušia. Podporujú verejnú správu aj občanov pri prijímaní opatrení na zlepšenie životného prostredia a verejného zdravia.

Ich rozvoj v posledných rokoch predstavuje kľúčový smer modernizácie environmentálneho monitoringu v mestách aj na vidieku. Zavedenie LCS do monitorovacích sietí prispieva k demokratizácii prístupu k údajom o kvalite ovzdušia – merania môžu realizovať nielen inštitúcie, ale aj samosprávy a občianske iniciatívy (napr. v rámci citizen science).



Obr. 4. Príklad nainštalovaného nízkonákladového senzora znečistenia ovzdušia (zdroj: <https://grist.org/health/low-cost-sensors-are-helping-communities-find-gaps-in-air-quality-data/>).

4. Prínosy využívania moderných metód monitorovania kvality ovzdušia a spôsoby eliminácie škodlivých emisií v porovnaní s konvenčnými riešeniami používanými samosprávami

Záujem o rozvoj moderných systémov monitorovania kvality ovzdušia v posledných rokoch rastie, čo vyplýva z potreby presnejšieho a dostupnejšieho merania znečistenia atmosféry. Tradičné riešenia používané samosprávami, napríklad v Poľsku založené najmä na referenčných stanicích Hlavného inšpektorátu ochrany životného prostredia (GIOŚ), poskytujú veľmi vysokú presnosť, avšak ich počet je obmedzený z dôvodu vysokých investičných a prevádzkových nákladov (GIOŚ, 2022). V dôsledku toho majú údaje o kvalite ovzdušia bodový charakter a nedokážu plne zachytiť priestorovú variabilitu koncentrácií znečisťujúcich látok na lokálnej úrovni.

Moderné metódy, založené na technológiách nízkonákladových senzorov (LCS), Internetu vecí (IoT) a cloudovej analýze dát, umožňujú vytvárať husté meracie siete s vysokým priestorovým a časovým rozlíšením (Karagulian et al., 2019). Vďaka prenosu dát v reálnom čase je možné rýchlo reagovať na smogové epizódy, analyzovať trendy a identifikovať zdroje emisií. Tieto systémy sú čoraz častejšie podporované algoritmami strojového učenia, ktoré umožňujú kalibráciu lacných senzorov na základe referenčných údajov a tým zvyšujú ich presnosť (Spinelle et al., 2017).

Dalšou výhodou moderných riešení je ich mobilita a flexibilita. Sensory môžu byť inštalované na budovách, vozidlách, dronoch alebo prvkoch mestskej infraštruktúry, čo umožňuje monitorovať oblasti, ktoré doteraz neboli pokryté meracou sieťou (Snyder et al., 2013). Integrácia údajov zo zemných senzorov, satelitných meraní (napr. misia Sentinel-5P) a numerických modelov (CAM5, WRF-Chem) umožňuje vytvárať komplexné mapy kvality ovzdušia na regionálnej úrovni (ESA, 2018).

Využívanie moderných monitorovacích technológií prináša aj spoločenské a vzdelávacie prínosy. Verejný prístup k aktuálnym údajom prostredníctvom mobilných aplikácií a internetových portálov (napr. Airly, Syngeos) zvyšuje environmentálne povedomie obyvateľstva a umožňuje ľuďom prijímať informované rozhodnutia, napríklad o pobyte vonku alebo spôsobe vykurovania. Pre samosprávy to znamená efektívnejšie plánovanie protismogových opatrení, kontrolu zdrojov emisií a optimalizáciu preventívnych aktivít.

Na záver možno konštatovať, že moderné systémy monitorovania kvality ovzdušia predstavujú významné doplnenie klasických referenčných metód. Vďaka nižším nákladom, vyššej dostupnosti údajov a možnosti ich integrácie a analýzy v reálnom čase umožňujú efektívnejšie riadenie kvality ovzdušia a prispievajú k zlepšeniu verejného zdravia.

Spis literatury

- ABB Analytical Measurement. (2020). FTIR Gas Analyzers – User Manual and Application Guide. Zurich, Switzerland: ABB Ltd.
- Air Liquide. (2019). FTIR Gas Analysis: Principles and Applications in Emission Control. Technical White Paper. Paris, France: Air Liquide.
- Castell, N., Dauge, F. R., Schneider, P., Vogt, M., Lerner, U., Fishbain, B., Broday, D., & Bartonova, A. (2017). Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates? *Environment International*, 99, 293–302. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.12.007>
- European Committee for Standardization. (2014). EN 15267 & EN 14181: Quality assurance of automated measuring systems for emission monitoring. Brussels: CEN.
- European Space Agency. (2018). Sentinel-5P: TROPOMI Instrument Performance Report. Noordwijk, Netherlands: ESA Publications.
- Główny Inspektorat Ochrony Środowiska. (2022). Stan jakości powietrza w Polsce – Raport roczny 2021. Warszawa: GIOŚ.
- Griffith, D. W. T. (1996). Synthetic calibration and quantitative analysis of gas-phase FTIR spectra. *Applied Spectroscopy*, 50(1), 59–70. <https://doi.org/10.1366/0003702963906627>
- Griffiths, P. R., & de Haseth, J. A. (2007). *Fourier Transform Infrared Spectrometry* (2nd ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Heland, J., Schäfer, K., Haus, R., & Platt, U. (2002). Determination of source strength and flux of air pollutants using open-path FTIR. *Atmospheric Environment*, 36(20), 3497–3508. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00286-5](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00286-5)
- Hollas, J. M. (2004). *Modern Spectroscopy* (4th ed.). Chichester, UK: John Wiley & Sons.
- Karagulian, F., Barbiere, M., Kotsev, A., Spinelle, L., Gerboles, M., Lagler, F., Redon, N., Crunaire, S., & Borowiak, A. (2019). Review of the performance of low-cost sensors for air quality monitoring. *Atmosphere*, 10(9), 506. <https://doi.org/10.3390/atmos10090506>
- Karagulian, F., Gerboles, M., Barbiere, M., Kotsev, A., Lagler, F., Borowiak, A., & Mazzuca, G. (2019). Review of sensors for air quality monitoring. *Atmospheric Environment*, 219, 117066. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117066>
- Mead, M. I., Popoola, O. A. M., Stewart, G. B., Landshoff, P., Calleja, M., Hayes, M., Baldovi, J. J., McLeod, M. W., Hodgson, T. F., Dicks, J., Lewis, A., Cohen, J., Baron, R., Saffell, J. R., & Jones, R. L. (2013). The use of electrochemical sensors for monitoring urban air

- quality in low-cost, high-density networks. *Atmospheric Environment*, 70, 186–203. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.11.060>
- Nakamoto, K. (2009). *Infrared and Raman Spectra of Inorganic and Coordination Compounds* (6th ed.). Hoboken, NJ: Wiley-Interscience.
- Pacific Northwest National Laboratory. (2020). *Infrared Spectral Database for Gas-Phase Molecules*. Richland, WA: PNNL. Retrieved from <https://secure3.pnl.gov/nsd/nsd.nsf>
- Rothman, L. S., Gordon, I. E., Barbe, A., Benner, D. C., Bernath, P. F., Birk, M., ... & Wagner, G. (2013). The HITRAN2012 molecular spectroscopic database. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 130, 4–50. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2013.07.002>
- Smith, B. C. (2011). *Fundamentals of Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (2nd ed.). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Snyder, E. G., Watkins, T. H., Solomon, P. A., Thoma, E. D., Williams, R. W., Hagler, G. S. W., ... & Preuss, P. W. (2013). The changing paradigm of air pollution monitoring. *Environmental Science & Technology*, 47(20), 11369–11377. <https://doi.org/10.1021/es4022602>
- Spinelle, L., Gerboles, M., Villani, M. G., Aleixandre, M., & Bonavitacola, F. (2017). Field calibration of a cluster of low-cost available sensors for air quality monitoring. *Sensors*, 17(10), 2420. <https://doi.org/10.3390/s17102420>
- Spinelle, L., Gerboles, M., Kok, G., Persijn, S., & Sauerwald, T. (2017). Review of portable and low-cost sensors for the ambient air monitoring of benzene and other volatile organic compounds. *Sensors*, 17(7), 1520. <https://doi.org/10.3390/s17071520>
- St. Louis, R., & Thompson, D. (2009). Air monitoring using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). *Environmental Monitoring Journal*, 11(3), 121–134.
- Thermo Fisher Scientific. (2021). *FTIR Gas Analysis Systems: Operation and Calibration Manual*. Waltham, MA: Thermo Fisher Scientific.
- Uniwersytet Śląski. Nauka i badania. Uniwersyteckie Laboratoria Kontroli Atmosfery. <https://us.edu.pl/nauka-i-badania/centra-badawcze/ulka/> (dostęp: 24.01.2025)
- Uniwersytet Śląski (2019) Patent, dzięki któremu będziemy oddychać czystszy powietrzem <https://us.edu.pl/patent-dzieki-ktoremu-bedziemy-oddychac-czystszym-powietrzem/> (dostęp: 24.01.2025)
- U.S. Environmental Protection Agency. (2017). *Measurement of Gaseous Emissions by Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy (Method 320)*. Washington, DC: EPA.

