

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

STANDARDOWE METODY PRZECIWDZIAŁANIA SKUTKOM ZANIECZYSZCZENIA POWIETRZA W OBSZARZE WSPARCIA

Wprowadzenie

Monitoring jakości powietrza oraz wdrożenie metod eliminacji szkodliwej emisji zanieczyszczeń są niezwykle istotnymi elementami w zarządzaniu środowiskiem i ochronie zdrowia publicznego. Zanieczyszczenia atmosfery stanowią szczególny problem w regionach uprzemysłowionych i o wysokim stopniu urbanizacji. Województwa śląskie i małopolskie są obszarami z najbardziej zanieczyszczonym powietrzem w Polsce, co obrazują raporty m.in. Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska. Taki stan powietrza w tych regionach wynika ze spalania paliw stałych w domowych piecach grzewczych i lokalnych kotłowniach węglowych, działalności kopalni, hut i licznych zakładów przemysłowych, gęstej sieci transportowej, a także z górskiego ukształtowania terenu i obecności wielu kotlin, w których przez słabą wentylację powietrza gromadzą się zanieczyszczenia. Topografia ma także znaczenie dla jakości powietrza w województwie podkarpackim, które również jest uwzględnione w tej analizie. Problem spalania paliw stałych w gospodarstwach domowych oraz pozaklasowych pieców i kotłów dotyczy całego kraju, jednak zostały podjęte kompleksowe działania ukierunkowane na eliminację tego źródła zanieczyszczeń. Przez wszystkie trzy województwa przechodzi ważny szlak komunikacyjny, który także powoduje emisję zanieczyszczeń omawianych w niniejszym opracowaniu.

Problemy emisji zanieczyszczeń pochodzących ze spalania paliw stałych w gospodarstwach domowych, transportu, a także górskiego ukształtowania terenu i osadzania się szkodliwych substancji dotyczą również regionów północnej Słowacji: Krajów Żylińskiego, Preszowskiego i Koszyckiego. Warto zaznaczyć, że na Słowacji dominują niskoemisyjne źródła energii pochodzące z elektrowni jądrowych (2/3 energii elektrycznej kraju) i wodnych (20%). W 2023 roku zaplanowano budowę kolejnej elektrowni jądrowej. W tym samym roku zamknięto ostatnią działającą elektrownię opalaną węglem brunatnym, co położyło kres energetyce węglowej na Słowacji. W celu ograniczenia emisji zanieczyszczeń pochodzących z zakładów przemysłowych, gospodarstw domowych i transportu na Słowacji także zostały uruchomione liczne proekologiczne projekty.

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

Celem pomiarów i oceny jakości powietrza jest zdobycie informacji o poziomach substancji w powietrzu w odniesieniu do standardów jakości powietrza, określenie obszarów wymagających poprawy jakości powietrza oraz ewaluacja efektywności programów naprawczych.

W polskim systemie prawnym istnieje szereg regulacji będących podstawą monitoringu jakości powietrza, do których zalicza się:

-Ustawę z dnia 27 kwietnia 2001 r. – Prawo ochrony środowiska (Dz.U. 2001 nr 62 poz. 627 z późn. zm.). Określono w niej m.in. zasady monitoringu jakości powietrza, klasyfikację stref pod kątem poziomu zanieczyszczeń oraz obowiązek prowadzenia monitoringu i rocznych ocen jakości powietrza, w tym publikowania ich wyników. Oceny powinny stanowić podstawę do opracowywania programów ochrony powietrza w województwach, w których normy jakości powietrza zostały przekroczone.

- Ustawę z dnia 3 października 2008 r. o udostępnianiu informacji o środowisku i jego ochronie, udziale społeczeństwa w ochronie środowiska oraz o ocenach oddziaływania na środowisko (Dz.U. 2008 nr 199 poz. 1227 z późn. zm.)

-Programy Ochrony Powietrza - dokumenty strategiczne opracowywane przez zarządy województw w Polsce w celu poprawy jakości powietrza na obszarach, gdzie występują przekroczenia norm jakości powietrza określonych w przepisach prawa. Wymagane są na mocy ustawy z dnia 27 kwietnia 2001 r. – Prawo ochrony środowiska, a także Dyrektywy UE 2008/50/WE w sprawie jakości powietrza i czystszej powietrza dla Europy.

-Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 15 lutego 2023 r. w sprawie zakresu i sposobu przekazywania informacji dotyczących zanieczyszczenia powietrza (Dz.U. 2023 poz. 350)

Ponadto do polskiego prawa wdrożono następujące dyrektywy Unii Europejskiej:

-Dyrektywę 2008/50/WE w sprawie jakości powietrza i czystszej powietrza dla Europy.

-Dyrektywę 2004/107/WE dotyczącą arsenu, kadmu, rtęci, niklu i wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych w powietrzu.

Dostosowanie przepisów krajowych do dyrektyw UE zapewnia integralność metod monitoringu i oceny jakości powietrza na poziomie europejskim.

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

Z kolei sposoby eliminacji szkodliwej emisji zanieczyszczeń do atmosfery regulowane są przez zbiór następujących aktów prawnych:

-Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. – Prawo budowlane (Dz.U. 1994 nr 89 poz. 414 z późn. zm.) określa obowiązek stosowania energooszczędnych i niskoemisyjnych technologii w budownictwie oraz wymogi przeprowadzania świadectw energetycznych dla budynków, co stanowi pośrednie wsparcie dla redukcji emisji.

-Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. – Prawo ochrony środowiska (Dz.U. 2001 nr 62 poz. 627 z późn. zm.). Dokument ten reguluje zasady zapobiegania emisjom, określa obowiązki związane z redukcją zanieczyszczeń, nakłada obowiązek ograniczenia emisji z instalacji przemysłowych oraz transportu oraz wprowadza normy emisyjne i obowiązek stosowania najlepszych dostępnych technik.

-Ustawa z dnia 16 kwietnia 2004 r. o ochronie przyrody (Dz.U. 2004 nr 92 poz. 880 z późn. zm.). Obejmuje ona przepisy dotyczące ochrony ekosystemów, które mogą być narażone na zanieczyszczenia powietrza i promuje działania redukujące emisję w obszarach chronionych, takich jak parki narodowe i rezerваты przyrody.

- Ustawa z dnia 17 lipca 2009 r. o systemie zarządzania emisjami gazów cieplarnianych i innych substancji (Dz.U. 2009 nr 130 poz. 1070 z późn. zm.). Określa m.in. zasady krajowego systemu bilansowania i prognozowania emisji gazów cieplarnianych i innych substancji.

-Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii (Dz.U. 2015 poz. 478 z późn. zm.). Promuje ona wykorzystanie odnawialnych źródeł energii (OZE) jako alternatywy dla paliw kopalnych oraz rekomenduje stosowanie technologii ograniczających emisję CO₂ oraz innych gazów cieplarnianych.

- Ustawa z dnia 12 czerwca 2015 r. o systemie handlu uprawnieniami do emisji gazów cieplarnianych (Dz.U. 2015 poz. 1223 z późn. zm.).

-Rozporządzenie Ministra Klimatu z dnia 24 września 2020 r. w sprawie standardów emisyjnych dla niektórych rodzajów instalacji, źródeł spalania paliw oraz urządzeń spalania lub współspalania odpadów (Dz.U. 2020 poz. 1860).

-Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 14 czerwca 2019 r. w sprawie programów ochrony powietrza oraz planów działań krótkoterminowych (Dz.U. 2019 poz. 1159).

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

-Program „Czyste Powietrze” (2018–). Realizowany jest na podstawie przepisów Prawa ochrony środowiska oraz Krajowego Programu Ochrony Powietrza. W ramach tego programu finansowane są wymiany starych pieców na paliwa stałe na bardziej ekologiczne źródła ogrzewania, a także promowane są odnawialne źródła energii, termomodernizacje budynków oraz redukcje emisji z indywidualnych źródeł ogrzewania.

- Uchwały antysmogowe na poziomie wojewódzkim. Są to regionalne regulacje prawne wprowadzane przez sejmiki wojewódzkie na podstawie art. 96 ustawy z dnia 27 kwietnia 2001 roku – Prawo ochrony środowiska. Zakres regulacji w nich zawartych obejmuje: rodzaje dopuszczalnych paliw do użycia w instalacjach grzewczych, wraz z zakazem stosowania paliw niskiej jakości, standardy dla urządzeń grzewczych, terminy wymiany starych urządzeń i ograniczenia dotyczące instalacji nowych.

-Krajowy Program Ochrony Powietrza (KPOP). Jest to dokument strategiczny określający działania w kierunku ochrony jakości powietrza na poziomie krajowym, takie jak ograniczenie emisji przemysłowych, rozwój transportu niskoemisyjnego czy promowanie ekologicznego ogrzewania.

W kwestii eliminacji emisji szkodliwych zanieczyszczeń w polskim prawie obowiązują także dyrektywy Unii Europejskiej:

-Dyrektywa 2010/75/UE w sprawie emisji przemysłowych (IED, ang. Industrial Emissions Directive) – określa zasady stosowania najlepszych dostępnych technik (BAT).

-Dyrektywa 2008/50/WE w sprawie jakości powietrza i czystsze powietrze dla Europy – określa normy dla emisji zanieczyszczeń w celu poprawy jakości powietrza.

Przestrzeganie powyższych regulacji zapewnia realizację krajowych celów ochrony środowiska, a także zobowiązań wynikających z członkostwa w Unii Europejskiej.

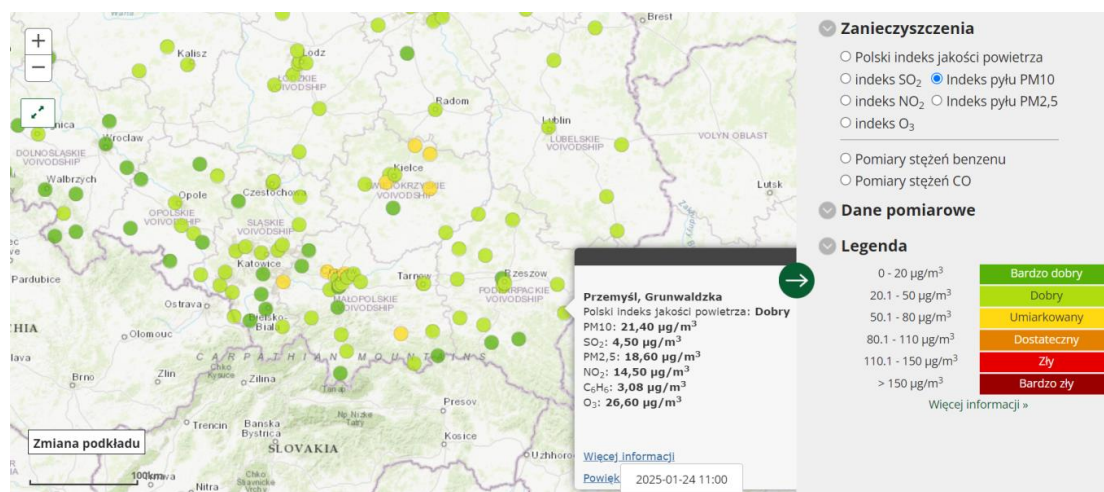
Na podstawie przepisów ustawy Prawo ochrony środowiska i rozporządzeń wykonawczych GIOŚ prowadzi pomiary stężeń dwutlenku siarki, dwutlenku azotu, tlenków azotu, benzenu, tlenku węgla, ozonu, pyłu zawieszonego PM10 i PM2,5 oraz pomiary ołowiu, arsenu, kadmu, niklu i benzo(a)pirenu w pyłe PM10. W niektórych stacjach miejskich mierzony jest także skład pyłu PM10 pod kątem zawartości 6 wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA), poza wspomnianym wcześniej benzo(a)pirenem. W ramach Państwowego Monitoringu Środowiska (PMŚ) na terenach oddalonych od źródeł emisji prowadzone są także pomiary kationów (Na⁺, K⁺,

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

Ca²⁺, Mg²⁺, NH⁴⁺), anionów (SO₄²⁻, NO³, Cl⁻), węgla organicznego i elementarnego w pyłe PM_{2,5} oraz pomiary całkowitej rtęci gazowej.

Z powodu wysokich stężeń zanieczyszczeń powietrza województwa śląskie i małopolskie zaliczają się do regionów, w których znajduje się najwięcej stanowisk pomiarowych funkcjonujących w ramach PMŚ (odpowiednio 212 i 169). W województwie podkarpackim takich stanowisk jest 110 (stan na rok 2024).



Ryc. 1 Mapa południowej Polski z naniesionymi punktami obrazującymi jakość powietrza pod względem indeksu pyłu PM 10 według skali widocznej po prawej stronie. Na mapie naniesione są także wyniki pomiarów stężeń zanieczyszczeń z jednej z automatycznych stacji pomiarowych (źródło: powietrze.gios.gov.pl/)

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien



Ryc.2 Mapa północnej i wschodniej części Słowacji wraz z zaznaczonymi stacjami pomiarowymi i wynikami pomiarów zanieczyszczeń z jednej ze stacji. Wyróżniony obszar na mapie (kolorem pomarańczowym) i alert w górnej części strony wskazuje na wystąpienie smogu z powodu przekroczenia dopuszczalnego poziomu PM₁₀ w danym regionie (źródło: www.shmu.sk)

Metodyka

Analizę opracowano w formie pisemnej i dotyczy metod stosowanych w zakresie monitoringu jakości powietrza oraz sposobów eliminacji szkodliwej emisji zanieczyszczeń do atmosfery, stosowanym przez samorządy położone w tzw. obszarze wsparcia projektu (analiza nr 1). Obszar wsparcia projektu obejmuje następujące powiaty w Polsce: w województwie śląskim: pszczyński, cieszyński, bielski, miasto na prawach powiatu Bielsko-Biała, żywiecki, w województwie małopolskim: olkuski, chrzanowski, oświęcimski, wadowicki, suski, myślenicki, tatrzański, nowotarski, limanowski, nowosądecki, miasto na prawach powiatu Nowy Sącz, gorlicki, w województwie podkarpackim: bieszczadzki, leski, sanocki, brzozowski, krośnieński, miasto na prawach powiatu Krosno, jasielski, rzeszowski, miasto na prawach powiatu Rzeszów, przeworski, przemyski, miasto na prawach powiatu Przemyśl, jarosławski, lubaczowski. Na Słowacji: w Żylińskim Kraju Samorządowym: Čadca, Kysucké Nové Mesto, Bytča, Žilina, Martin, Turčianske Teplice, Ružomberok, Dolný Kubín, Námestovo, Tvrdošín, Liptovský Mikuláš, w Preszowskim Kraju Samorządowym: Poprad, Kežmarok, Stará Ľubovňa, Levoča, Sabinov, Bardejov, Svidník, Prešov,

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

Vranov nad Topľou, Stropkov, Medzilaborce, Humenné, Snina, w Koszyckim Kraju Samorządowym: Spišská Nová Ves.

Analizy dokonano na podstawie przeglądu dostępnych publikacji naukowych, tematycznych opracowań i materiałów oraz regulacji prawnych. Spis literatury podano na końcowych stronach opracowania. Analiza podzielona jest na rozdziały:

- 1) Referencyjne metody pomiaru jakości powietrza (z podrozdziałami dotyczącymi poszczególnych zanieczyszczeń)
- 2) Pozostałe metody
- 3) Sposoby eliminacji zanieczyszczeń na obszarze wsparcia projektu – odnawialne źródła energii (OZE)

Pierwsze dwa rozdziały, zgodnie z wytycznymi dla tej analizy, opracowano na podstawie schematu:

- a) opis techniczny analizowanych metod monitoringu jakości powietrza oraz sposobach eliminacji szkodliwej emisji zanieczyszczeń do atmosfery wraz założeniami teoretycznymi,
- b) opis wad i zalet każdej metody,
- c) ocenę przydatności zastosowania poszczególnych metod,
- d) przykłady zastosowania metod monitoringu jakości powietrza oraz sposobów eliminacji szkodliwej emisji zanieczyszczeń do atmosfery z powiatów/okresów położonych w obszarze wsparcia zarówno polskich jak i słowackich.

1) Referencyjne metody pomiaru jakości powietrza

1.1. Pomiar pyłów PM_{2.5}, PM₁₀ – metoda grawimetryczna

a) opis techniczny

Metodą referencyjną dla pomiaru pyłów PM_{2.5} i PM₁₀ jest metoda grawimetryczna. Jest to technika manualna, a metody stosowane w automatycznych stacjach pomiarowych są na niej wzorcowane. Według wytycznych zawartych w normach, w celu przeprowadzenia tego pomiaru powietrze musi być zasysane w pobornikach przez głowicę separacyjną ze stałą prędkością nominalną o wartości 2,3m³/h. Frakcja pyłu osadza się na filtrze, który jest eksponowany przez dobę. W celu określenia masy pyłu, filtr jest ważony przed i po ekspozycji.

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

Zwykle w pomiarach stosuje się filtry kwarcowe. Ilość powietrza przepuszczonego przez filtr również powinna być znana w celu wyliczenia stężenia pyłu zawieszonego pobranego przez pobornik. Przepływ w poborniku należy utrzymać na stałym poziomie wynoszącym 2,3 m³/h – chwilowe odchylenie od nominalnej wartości przepływu nie powinno być większe niż 5% - jest to bardzo istotne dla właściwej selekcji frakcji pyłu przechodzącej przez głowicę separującą.

Kolejnym etapem jest proces ważenia filtrów, który musi się odbywać w pokoju wagowym spełniającym rygorystyczne warunki (m.in. temperatura 19-21°C, wilgotność 45-50%, rozdzielczość wagi ≤ 10µg – wszystkie wartości mierzone jako średnie godzinowe). Muszą być one stale monitorowane w celu zapewnienia zgodności z obowiązującymi standardami.

Przed pobraniem prób w pobornikach pyłowych filtry muszą być oznaczone i poddane procesowi kondycjonowania – filtry umieszcza się w pokoju wagowym na co najmniej 48 godzin, a następnie należy zważyć filtry. Po tym czasie filtry są ponownie kondycjonowane przez przynajmniej 12 godzin i znów są mierzone. Różnica mas między pierwszym a drugim wynikiem ważenia nie powinna być większa niż 40 µg. Jeśli ten warunek nie jest spełniony, dany filtr może być odrzucony i uznany jako nieprzydatny lub ponownie kondycjonowany przez co najmniej 24 godziny. Następnie są ważone i pomiar jest powtarzany uwzględniając drugie i trzecie ważenie. W sytuacji gdy warunek ten znów nie zostaje spełniony filtry zostają odrzucone jako nieprawidłowe. Masa czystych filtrów podawana jest jako średnia z dwóch ważeń.

Po zważeniu filtry są specjalnie pakowane i przechowane w pojemnikach transportowych, a następnie dostarczane są do docelowej lokalizacji, gdzie są umieszczane w pobornikach pyłowych. Podczas pakowania filtry muszą być odpowiednio oznaczone, aby było wiadomo, którego dnia dana próba została pobrana. Filtry po wyeksponowaniu są transportowane do laboratorium przy zachowaniu odpowiednich warunków. Tam odbywa się kondycjonowanie wyeksponowanych filtrów przez przynajmniej 48 godzin. Następnie filtry są ważone, a później znów kondycjonowane od 24 do 48 godzin i ważone. Różnica mas wyeksponowanych filtrów między pierwszym i drugim ważeniem nie powinna przekraczać 60 µg. Analogicznie do procesu przygotowywania filtrów, jeśli różnica ta jest zbyt wysoka, filtry zostają odrzucone i wartości uznane za nieprawidłowe lub poddane kolejnemu kondycjonowaniu przez przynajmniej 24 godzin. Po tym czasie filtry są ważone po raz trzeci i jeżeli różnica między drugim i trzecim ważeniem znów przekracza wartość 60 µg, wówczas filtry są odrzucane, a wyniki należy unieważnić. Ostateczny wynik masy filtrów wyeksponowanych stanowi średnią z dwóch ważeń. Przy obliczaniu stężenia pyłu zawieszonego w powietrzu stosuje się wzór:

$$c = \frac{ml - mu}{\varphi a \cdot t}$$

gdzie: c – stężenie [µg/m³], ml – masa filtra z pyłem [µg], mu – masa filtra czystego [µg]; φa – przepływ w warunkach rzeczywistych [m³/h], t – czas poboru [h].

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

b) wady i zalety

Metoda grawimetryczna jest standardową metodą referencyjną i inne techniki muszą być kalibrowane w stosunku do niej. Dostarcza bardzo precyzyjne wyniki pomiaru pyłów różnych frakcji (PM10, PM2,5), ale możliwe są także analizy innych substancji (np. określenie stężenia wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych lub metali ciężkich). Przy jej użyciu nie jest wymagane stałe zasilanie, tylko podczas ważenia i suszenia. Sprzęt do poboru próbek jest prosty i niedrogi w porównaniu do automatycznych metod. Metoda ta jest jednak czasochłonna i niemożliwe jest uzyskanie wyników pomiaru w czasie rzeczywistym, ani monitorowanie dynamicznych zmian stężeń pyłów w krótkich przedziałach czasowych. Muszą być też utrzymywane rygorystyczne standardy dotyczące temperatury i wilgotności pomieszczeń, w których przeprowadzana jest analiza. Konieczna jest też regularna wymiana filtrów i kalibracja urządzeń, a obsługa sprzętu i analiza próbek musi być przeprowadzana przez wykwalifikowanych pracowników, co generuje dość wysokie koszty eksploatacyjne. Istnieje ryzyko starty materiału podczas transportu lub ważenia próbki, co może wpłynąć na precyzję uzyskanych wyników.

c) ocena przydatności metody

Technika grawimetryczna jest bardzo przydatna w długoterminowym monitoringu stacjonarnym, gdzie konieczne jest precyzyjne określenie stężeń pyłów. Jest też niezastąpioną metodą referencyjną, którą stosuje się przy kalibracji sprzętu do pomiaru automatycznego i mikrosensorów (zgodnie z normą PN-EN 12341:2014-07 Powietrze atmosferyczne – Standardowa grawimetryczna metoda pomiarowa do określania stężeń masowych frakcji PM10 lub PM2,5 pyłu zawieszonego). Pomimo czasochłonności metody i braku dostarczenia wyników w czasie rzeczywistym, metoda ta jest niezawodna i bardzo dokładna.

d) przykłady zastosowania metod monitoringu jakości powietrza oraz sposobów eliminacji szkodliwej emisji zanieczyszczeń do atmosfery

Z uwagi na skalę problemu zanieczyszczeń powietrza, województwa śląskie i małopolskie są liderami we wdrażaniu rozwiązań eliminujących emisję zanieczyszczeń. Przede wszystkim prowadzona jest modernizacja systemów grzewczych polegająca na wymianie pieców i kotłów na paliwa stałe w ramach programu „Czyste powietrze”, a także regionalnych programów dotacyjnych.

Pierwszym miastem w Polsce, w którym zaczął obowiązywać zakaz stosowania węgla i drewna w kotłach, piecach i kominkach był Kraków (od 2019 roku). Na mocy uchwały antysmogowej przyjętej w Małopolsce konieczna jest wymiana starych kotłów grzewczych 3. i 4. klasy na nowoczesne źródła ciepła do końca 2026 roku. Jako alternatywne źródła energii

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

proponowane są: ogrzewanie z miejskiej sieci ciepłowniczej, ogrzewanie elektryczne, pompy ciepła, kotły gazowe, kotły na lekki olej opałowy lub na węgiel czy drewno spełniające wymogi ekoprojektu. Do dyspozycji mieszkańców Małopolski jest także bezpłatne doradztwo energetyczne w Małopolskim Centrum Czystego Powietrza.

Efektom wdrożenia programów i uchwały antysmogowej była likwidacja ponad 95 tys. kotłów i pieców na paliwa stałe na obszarze Małopolski w latach 2017-2023. Zostały one zastąpione głównie kotłami gazowymi. Dodatkowo przeprowadzono termomodernizację ponad 18 tys. budynków, a w 65 tys. obiektów zainstalowano odnawialne źródła energii. Przytoczone powyżej przykłady modernizacji we wskazanym okresie pozwoliły na redukcję emisji pyłu PM10 o ponad 3737 ton, a pyłu PM2,5 o 3550 ton (powietrze.malopolska.pl).

Przykładami działania w kierunku eliminacji zanieczyszczenia pyłami na terenie całej Słowacji są programy „Zelená domácnostiam” (Zielone dla Gospodarstw Domowych) i „Zelená solidarita” (Zielona Solidarność) działające w latach 2015-2023. W ramach tych programów uruchomiono dofinansowania do wymiany starych kotłów na paliwa stałe na ekologiczne źródła ogrzewania. Są one kontynuacją trzech pierwszych udanych ogólnokrajowych projektów Zieleń dla Gospodarstw Domowych, które w latach 2015–2023 były finansowane ze środków Programu Operacyjnego Jakość Środowiska. Dzięki europejskiemu i krajowemu wsparciu w słowackich gospodarstwach domowych zainstalowano do tej pory prawie 60 tys. urządzeń wykorzystujących odnawialne źródła energii (dane dotyczą całego kraju). Wsparcia udzielono przy instalacji 20 716 pomp ciepła, 16 998 systemów fotowoltaicznych, 14 516 kolektorów słonecznych i 7045 kotłów na biomasę. Gospodarstwa domowe wykorzystały bony o wartości 124,5 mln euro na zakup sprzętu. Łączna moc zainstalowana obsługiwanych obiektów przekroczyła 460 MW. Gospodarstwa domowe mogły wybierać spośród ponad 5000 określonych typów urządzeń, które spełniały wymagane wymagania techniczne (www.siea.sk).

W celu ograniczenia emisji pyłu ze spalania węgla kamiennego lub brunatnego, w ramach konkluzji BAT dla dużych obiektów energetycznego spalania, konieczne jest stosowanie jednej z wymienionych technik lub ich kombinacji: elektrofiltrów ESP, filtrów workowych, wtrysku sorbentu do kotła, suchego lub półsuchego systemu IOS czy odsiarczania spalin metodą mokrą (mokre IOS).

Wyżej wymienione programy, działania i instalacje pośrednio przyczyniają się także do eliminacji innych zanieczyszczeń takich jak tlenek węgla, tlenki azotu, dwutlenek siarki, ozon (poprzez redukcję prekursorów ozonu).

1.2. Pomiar NOx – metoda chemiluminescencji

a) opis techniczny

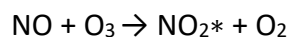
Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

Metoda chemiluminescencji wykorzystywana jest do pomiaru tlenków azotu (NO_x), w tym tlenku azotu (NO) i dwutlenku azotu (NO₂). Opiera się na detekcji światła emitowanego w wyniku reakcji chemicznej, dzięki czemu możliwe jest precyzyjne oznaczenie stężenia NO_x.

Początkowo próbka powietrza zostaje pobierana przy pomocy pompy i jest poddawana wstępnej filtracji w celu usunięcia z niej pyłu i wilgoci. Następnie, w komorze reakcyjnej zachodzi reakcja tlenku azotu (NO) z ozonem (O₃), a w jej wyniku powstaje wzbudzona cząsteczka dwutlenku azotu (NO₂*). Cząsteczka ta wraca do stanu podstawowego i jednocześnie emituje foton w zakresie promieniowania widzialnego lub ultrafioletowego.

Zjawisko to obrazują reakcje:



gdzie: $h\nu$ to foton (energia światła)

Emitowane światło jest rejestrowane przy pomocy detektora fotonów, zwykle fotopowielacza, który przekształca sygnał świetlny na sygnał elektryczny. Emitowane światło jest proporcjonalne do ilości NO zawartej w próbce. W celu przeprowadzenia pomiaru całkowitego stężenia NO_x, NO₂ musi być najpierw zredukowany do NO w komorze redukcyjnej przy użyciu katalizatora. W następnej fazie pomiaru, cała mieszanina NO_x poddawana jest reakcji z ozonem, a emitowane światło jest mierzone. Stężenie NO i NO₂ w badanej próbce jest obliczane na podstawie różnicy sygnałów świetlnych przed i po redukcji.

a) wady i zalety

Metoda ta jest bardzo czuła i precyzyjna – umożliwia wykrycie niskich stężeń NO_x. Ponadto reakcje będące podstawą tej metody zachodzą szybko, dzięki czemu możliwy jest monitoring NO_x w czasie rzeczywistym. Automatyzacja metody zapewnia możliwość stosowania jej na automatycznych stacjach pomiarowych. Rozważając wady chemiluminescencji należy wymienić wrażliwość na związki takie jak ozon czy amoniak, co może wpływać na zakłócenie pomiaru. Sprzęt

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

jest dość kosztowny w zakupie i utrzymaniu, wymaga też regularnej kalibracji i wymiany generatora ozonu i katalizatora.

b) ocena przydatności zastosowania metody

Zgodnie z obowiązującymi normami (PN-EN 14211:2013-02 Powietrze atmosferyczne – Standardowa metoda pomiaru stężenia ditlenku azotu i tlenku azotu za pomocą chemiluminescencji) opisywana metoda ta jest standardową metodą pomiaru stężenia NO_x. Stosowana jest w automatycznych stacjach monitoringu jakości powietrza, a także przy analizie emisji przemysłowych i transportowych. Jak wspomniano powyżej, metoda ta umożliwia precyzyjny pomiar stężenia NO_x w powietrzu, a wyniki są uzyskiwane natychmiast po wykonaniu pomiaru. Wyniki pomiaru wykonane w automatycznych stacjach pomiarowych są na bieżąco udostępniane, a na ich podstawie opracowywane są prognozy zanieczyszczeń. Metoda ta największe znaczenie w pomiarze NO_x spośród wszystkich znanych metod pomiaru tej substancji.

c) przykłady zastosowania metod monitoringu jakości powietrza oraz sposobów eliminacji szkodliwej emisji zanieczyszczeń

Metodę chemiluminescencji do pomiaru NO_x jest powszechnie stosowana w monitoringu jakości powietrza, np. w automatycznej stacji pomiarowej w miejscowości Ganovce w Preszowskim Kraju.

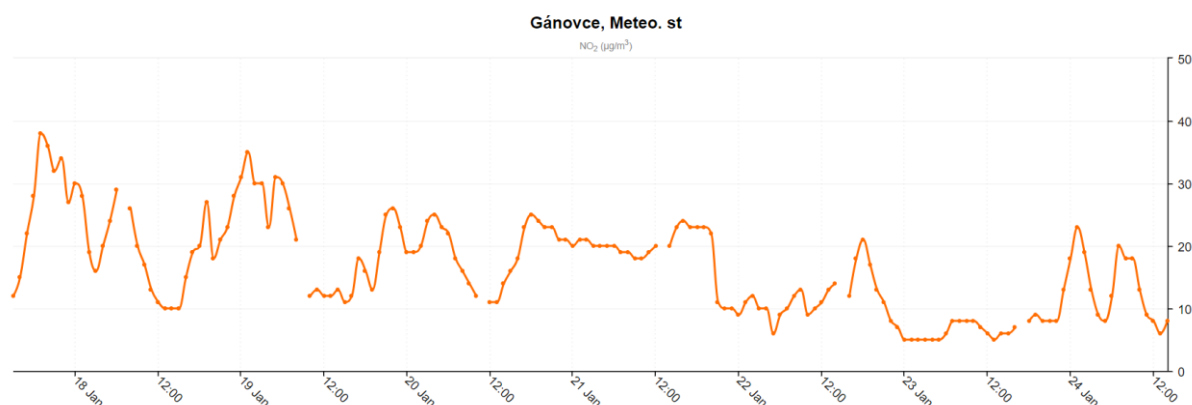
Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien



Ryc. 3 Automatyka stacja pomiarowa jakości powietrza w Ganovcach (źródło: shmu.sk).

Efektom pomiarów jest publikowanie bieżących komunikatów na stronie monitoringu środowiska, wraz z aktualnymi wynikami, opracowanymi prognozami na kolejne dni i danymi archiwalnymi.



Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

Dátum a čas merania	Hodnota ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
24.01.2025 14:00	8
24.01.2025 13:00	6
24.01.2025 12:00	8
24.01.2025 11:00	9
24.01.2025 10:00	13
24.01.2025 09:00	18
24.01.2025 08:00	18
24.01.2025 07:00	20
24.01.2025 06:00	12
24.01.2025 05:00	8
24.01.2025 04:00	9
24.01.2025 03:00	13
24.01.2025 02:00	19
24.01.2025 01:00	23
24.01.2025 00:00	18

Ryc. 4 Dane z pomiaru NO_x metodą chemiluminescencji w stacji Ganovce – powyżej wykres z bieżącymi wynikami pomiaru i danymi z kilku ostatnich dni, poniżej tabela ze wskazanymi wartościami liczbowymi stężenia NO_x dla poszczególnych godzin w danym dniu (źródło: shmu.sk)

Działania ograniczające emisję NO_x w dużej mierze pokrywają się z regulacjami mającymi na celu redukcję pyłów, ponieważ zwykle zanieczyszczenia te mają wspólne źródło. Zaliczają się do nich działania w zakresie redukcji emisji transportu i użytkowania starych pieców i paliw stałych.

W celu redukcji emisji NO_x, według konkluzji BAT dla dużych obiektów energetycznego spalania należy zastosować jedną z następujących technik lub ich kombinację: optymalizację spalania, kombinację innych technik podstawowych redukcji NO_x (np. stopniowane podawanie powietrza, stopniowane podawanie paliwa, recyrkulację spalin, palniki o niskiej emisji NO_x (LNB)), selektywną redukcję niekatalityczną (SNCR), selektywną redukcję katalityczną (SCR) lub techniki łączone mające na celu ograniczenie emisji NO_x i SO_x.

Przykładem redukcji obniżenia emisji NO_x jest instalacja kotłów fluidalnych w elektrowni w Jaworznie (Jaworzno II). Na początku lat 90-tych opracowano wieloetapowy plan modernizacji elektrowni, w którym założono m.in. wymianę kotłów pyłowych na kotły fluidalne. W roku 1999 w elektrowni zaczęły już działać pierwsze kotły tego typu. Pozwalają one na redukcję emisji tlenków azotu i siarki już w procesie spalania. Dzięki ich użyciu nie jest konieczne budowanie dodatkowych

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

kosztownych instalacji odsiarczania. W latach 2000 przebudowano elektrownię, w wyniku czego powstała elektrociepłownia z nowymi kotłami i turbinami. Obecnie Jaworzno II jest elektrociepłownią kondensacyjną, blokową, z zamkniętym układem chłodzenia i trzema blokami energetycznymi z kotłami fluidalnymi i turbinami ciepłowniczo-kondensacyjnymi o obecnej mocy 190 MWe i 321 MWt.

W innej elektrowni w tym regionie (Jaworzno III) opracowano wieloletni proekologiczny kompleksowy plan o nazwie „Program likwidacji zagrożeń dla środowiska w Elektrowni Jaworzno III”. Obejmował on m.in. takie zadania jak zainstalowanie systemu niskiej emisji NOx. Redukcję emisji NOx udało się osiągnąć dzięki instalacjom do redukcji tlenków azotu metodą selektywnej redukcji katalitycznej SCR przy wykorzystaniu amoniaku na trzech blokach energetycznych nr 1,3 i 5. W metodzie SCR zachodzi redukcja NOx poprzez reakcję z amoniakiem przy obecności katalizatora. Tlenki azotu rozkładają się na azot i wodę, przy czym proces wymaga temperatury gazów w niższym zakresie temperatur (od 150 do 400°C). W tym przedziale temperatur amoniak jest efektywnym reduktorem i zapewnia przebieg reakcji w obecności tlenu. Metoda SCR jest uważana za najbardziej skuteczną metodę eliminacji tlenków azotu – pozwala na obniżenie emisji NOx o 75 – 90%.

1.3 Pomiar CO – NDIR (Nondispersive infrared sensor)

a) opis techniczny

Spektroskopia absorpcyjna w podczerwieni (NDIR) jest wykorzystywana do pomiaru tlenku węgla (CO), na zasadzie pochłaniania przez cząsteczki CO promieniowania podczerwonego o określonej długości fali. W celu przeprowadzenia pomiaru emitowane jest promieniowanie podczerwone w szerokim zakresie długości fal. Przechodzi ono przez komorę, do której wpuszczana jest badana próbka powietrza. Dzięki filtrowi optycznemu ograniczane jest przepuszczanie promieniowania do wąskiego zakresu fal, których długości są charakterystyczne dla badanego gazu (w opisywanym przykładzie CO). Następnie detektor rejestruje ilość promieniowania, które do niego dotarło po przejściu przez komorę. Im większe stężenie CO w badanej próbce, tym więcej promieniowania zostaje pochłonięte, co w konsekwencji powoduje,

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

że mniej światła dociera do detektora. Wynik pomiaru wyrażany jest w ppm lub mg/mm^3 . Działanie metody NDIR opiera się na prawie Beera-Lamberta, według którego przy założeniu, że współczynnik absorpcji rozpuszczalnika jest równy zeru, to absorbancja promieniowania po przejściu przez roztwór jest wprost proporcjonalna do stężenia roztworu i grubości warstwy absorbującej.

b) wady i zalety

Metoda ta jest nieinwazyjna – nie wymaga przekształcania gazów, ani użycia chemicznych odczynników. Jest też bardzo czuła i selektywna – dokonuje dokładnego pomiaru gazów w szerokim zakresie stężeń. Sprzęt do pomiaru NDIR charakteryzuje trwałość i niezawodność i działa szybko, co umożliwi uzyskanie wyników w czasie rzeczywistym. Cechuje go też stosunkowa odporność na działanie czynników atmosferycznych. Jest jednak dość kosztowny w porównaniu z urządzeniami wykorzystywanymi według innych metod. Wymaga też regularnej kalibracji i konserwacji, zwłaszcza elementów optycznych. Istnieje też ryzyko, że inne gazy pochłaniające promieniowanie w podobnym zakresie mogą wpłynąć na wynik pomiaru.

c) ocena przydatności zastosowania metody

NDIR jest metodą o szerokim zastosowaniu, nie tylko w monitoringu jakości powietrza czy w testach emisji spalin, ale też w medycynie. Spośród wszystkich znanych metod pomiaru CO, metoda NDIR jest najczęściej używaną metodą pomiaru tego gazu w automatycznych stacjach pomiaru jakości powietrza, w zakładach przemysłowych i przy kontrolach motoryzacyjnych. Inne sposoby pomiaru, takie jak elektrochemiczne czy tlenkowo-półprzewodnikowe czujniki CO są mniej dokładne niż NDIR, jednak są wykorzystywane w systemach alarmowych czy urządzeniach przenośnych. Opisywana w poprzednim rozdziale chemiluminescencja może mieć też zastosowanie przy pomiarze CO, jednak z uwagi na konieczność przeprowadzenia procesów konwersji chemicznej, zdecydowanie częściej używa się metody NDIR mierząc stężenie tego gazu. Z kolei metoda FTIR, również uznawana za wysoce precyzyjną, działa w oparciu o zaawansowaną technologię i koszt urządzenia jest znacznie wyższy niż NDIR.

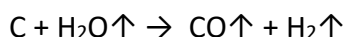
Według normy PN-EN 14626:2013-02 (Powietrze atmosferyczne – Standardowa metoda pomiaru stężenia tlenku węgla za pomocą niedispersyjnej spektroskopii w podczerwieni.) NDIR jest uznawana za metodę referencyjną przy pomiarze stężenia CO w powietrzu atmosferycznym.

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

d) przykłady zastosowania i sposoby eliminacji

CO powstaje w wyniku niepełnego spalania paliw kopalnych. Przy niedoborze powietrza do spalania, CO powstaje w spalinach w wyniku zajścia reakcji:



Niezupełne spalanie może być spowodowane:

- niedostatecznym wymieszaniem paliwa i powietrza, co powoduje obecność zbyt bogatych mieszanek lub nadmiernym zubożeniem mieszanki. W obu sytuacjach szybkość procesu spalania paliwa spada, albo
- zbyt szybkim wychłodzeniem produktów spalania w zimnej warstwie przyściennej w urządzeniach z dużym stosunkiem powierzchni komory do jej objętości.

Działania ukierunkowane na zmniejszenie zawartości tlenku węgla w spalinach mają na celu przyspieszenie jego utlenienia do dwutlenku węgla. Redukcję emisji CO można osiągnąć poprzez:

- dostarczenie odpowiedniej ilości powietrza,
- dostarczenie większej ilości tlenu,
- podgrzanie substratów,
- przedłużenie czasu procesu w strefie wysokich temperatur.

Redukcję emisji CO należy uzyskać dzięki poprawie procesu spalania, która jest powiązana z zastosowaniem sposobów ograniczenia emisji tlenków azotu. Według konkluzji BAT dla dużych obiektów energetycznego spalania, w celu ograniczenia emisji CO konieczne jest zapewnienie optymalnego spalania oraz zastosowania jednej z technik wymienionej w konkluzjach, np. łączenia i mieszania paliwa czy konserwacji układu spalania.

1.4 Pomiar SO₂ – fluorescencja UV

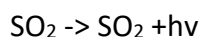
a) opis techniczny

W tej metodzie wykorzystywana jest zdolność cząsteczek dwutlenku siarki do emitowania światła o pewnej długości fali przy ich wzbudzeniu poprzez absorpcję promieniowania ultrafioletowego UV o określonej długości fali. Aby wzbudzić cząsteczki SO₂ w badanej próbce

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

powietrza, aktywowane jest promieniowanie UV o długości fali ~ 214 nm, które jest przez nie absorbowane. Zjawisko to powoduje, że cząsteczki SO_2 przechodzą do wyższego stanu energetycznego, a powracając do stanu podstawowego, emitują światło fluorescencyjne o większej długości fali wynoszącej 240-420 nm. Światło fluorescencyjne przechodzi przez filtr optyczny, który blokuje promieniowanie tła i wybiera długość fali charakterystyczną dla fluorescencji SO_2 . Następnie kierowane jest do detektora, który przekształca intensywność światła w sygnał elektryczny. Uzyskane dane są przeliczane przez system komputerowy i dostarczany jest wynik w jednostkach masy lub objętości. Stężenie SO_2 w badanej próbce powietrza jest proporcjonalne do intensywności emitowanego światła, a więc do sygnału elektrycznego. Zasadę działania tej metody obrazują poniższe reakcje:



$h\nu$ – intensywność promieniowania fluorescencyjnego jest proporcjonalna do stężenia SO_2 , zgodnie z poniższym wzorem:

$$F = k \cdot C_{\text{SO}_2}$$

gdzie: F – intensywność promieniowania fluorescencyjnego

k – współczynnik proporcjonalności

C_{SO_2} – stężenie SO_2

b) wady i zalety

Metoda fluorescencji UV do pomiaru SO_2 jest bardzo precyzyjna, gdyż zapewnia wykrycie stężenia rzędu ppb. Wyniki są dostarczane natychmiast, dzięki czemu możliwe jest stałe monitorowanie stężenia SO_2 . Przy zastosowaniu filtrów optycznych i wysokiej selektywności detektorów metoda ta nie jest podatna na wpływ innych gazów. Wśród wad należy wymienić kosztowność aparatury używanej do tej metody. Konieczna jest także regularna kalibracja, a także konserwacja i utrzymanie czystości optyki.

c) ocena przydatności

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

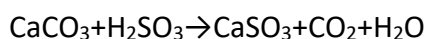
W automatycznych stacjach monitoringu jakości powietrza, m.in. funkcjonującymi w ramach PMŚ, stosuje się fluorescencję UV, która jest standardową metodą przy pomiarze SO₂, zgodnie z obowiązującymi polskimi normami i europejskimi normami (PN-EN 14212:2013-02 Powietrze atmosferyczne – Standardowa metoda pomiaru stężenia ditlenku siarki za pomocą fluorescencji w nadfiolecie). Cechują ją wysoka dokładność, szybkość i niezawodność. Pozostałe metody nie są często wykorzystywane, głównie przy prowadzeniu badań naukowych, a techniki takie jak FTIR używane są w zaawansowanych laboratoriach badawczych.

Fluorescencja UV jest często stosowana także w zakładach emitujących SO₂ (elektrownie, huty, koksownie) w systemach monitorowania emisji, a także do kontrolowania efektywności procesów takich jak odsiarczanie spalin. Pomimo wysokich kosztów zakupu, inwestycja w aparaturę jest opłacalna z uwagi na niezawodność niniejszej metody, a także stosunkowo niskie koszty dalszej eksploatacji.

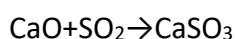
d) przykłady zastosowań i sposoby eliminacji

Głównym sposobem redukcji emisji SO₂ w zakładach przemysłowych jest odsiarczanie spalin. Proces ten polega na absorpcji SO₂ przy wykorzystaniu tlenku wapnia lub tlenku magnezu, co wyrażają poniższe reakcje:

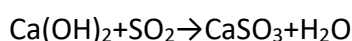
Reakcja przy użyciu wapienia:



Reakcja przy użyciu wapna palonego:



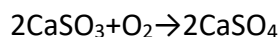
Reakcja przy użyciu wodorotlenku wapnia:



Następnie zachodzi utlenienie siarczanu(IV) wapnia (CaSO₃) do siarczanu(VI) wapnia (CaSO₄):

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien



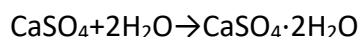
Analogiczne reakcje zachodzą przy użyciu MgO.

Wyróżnia się następujące metody odsiarczania:

-suchą – wykorzystywana jest przy spalaniu paliwa w kotle paleniskowym. Do komory paleniskowej doprowadzany jest sorbent i dochodzi wówczas do rozkładu – dekarbonizacji CaCO_3 lub dehydratyzacji Ca(OH)_2 i do wiązania SO_2 . Temperatura, przy której zachodzi proces, musi wynosić ponad 750°C , przy czym nie może też być zbyt wysoka i mieścić się w tzw. oknie temperaturowym. Poza tym sorbent należy równomiernie rozprowadzić w komorze paleniskowej, co bardzo często jest problematycznym zadaniem, a niewłaściwe wykonanie może znacząco obniżyć skuteczność metody. Wśród zalet tej metody należy wymienić niskie koszty inwestycyjne i prostotę budowy sprzętu.

-półsuchą – w tym wariantcie odsiarczania używany jest sorbent w postaci wodnej zawiesiny, który jest rozpylany w strumieniu spalin. Przy nawilżeniu spaliny obniżają swoją temperaturę – wraz ze spadkiem temperatury spalin zwiększa się efektywność odsiarczania. Wyróżnia się kilka metod tej wersji odsiarczania, przy czym każda z nich polega na tym samym zjawisku adsorpcji – zanieczyszczenia gazowe zatrzymywane są na zewnętrznych i wewnętrznych powierzchniach absorbentu. Po zakończeniu procesu odsiarczania spaliny trafiają do odpylaczy, a następnie w postaci produktu poprocesowego (popiół oraz część nieprzereagowanego sorbentu) do reaktora (podlegają recyrkulacji),

-moką – za najbardziej efektywną metodę uznaje się odsiarczanie spalin metodą moką wapniowo-wapienną (skuteczność 90–95%). W metodzie tej spaliny przeczyszczane są wodorotlenkiem wapnia, w wyniku czego zachodzą reakcje przedstawione powyżej. Finalnie w wyniku wiązania cząsteczek wody, końcowym produktem jest gips:



Produkt końcowy tej reakcji może być wykorzystany np. w budownictwie. W odróżnieniu od wcześniej wymienionych metod, przy tej metodzie jest większe zapotrzebowanie na wodę, a koszty inwestycyjne są wysokie, przy czym eksploatacja jest stosunkowo tania.

Innowacyjną metodą odsiarczania spalin jest odsiarczanie magnezowe. Stosuje się w niej związki magnezu, które cechuje wysoka reaktywność i rozpuszczalność, dzięki czemu skuteczniej absorbują SO_2 . Do utworzenia zawiesiny sorpcyjnej wykorzystuje się magnezyt prażony (złożonego

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

w 85% z MgO). Uznaje się, że skuteczność metody jest ok. 30% większa od metod wapniowych.

Z powodu wysokich kosztów inwestycyjnych i wyzwań eksploatacyjnych metoda magnezowa odsiarczania spalin jest rzadko stosowana. Fabryką, która wdrożyła tę metodę na obszarze wsparcia projektu jest Grupa Azoty (zakład nawozowo-chemiczny). W 2022 roku uruchomiono instalacje odsiarczania spalin dla kotła K-5 z wykorzystaniem odsiarczania tego typu. Tym samym osiągnięto założone cele projektowe dla tej instalacji, zgodnie z wymogami BAT w zakresie emisji gazów do powietrza. Metoda ta polega na absorpcji SO₂ w zawieszynie magnezytu prażonego (85% MgO). W wyniku procesu odsiarczania powstaje siedmiowodny siarczan magnezu, który może być stosowany w rolnictwie jako nawóz magnezowy lub jako jeden z elementów nawozu wieloskładnikowego. Uzyskiwanie takiej substancji w procesie odsiarczania spalin wpisuje się w cele działalności zakładu. W ramach dostosowania instalacji odsiarczania spalin do wymogów BAT m.in. zwiększono efektywność działania absorbera, zbudowano dodatkowy zbiornik cyrkulacyjny, nową pompownię, układ oczyszczania ścieków, a także ulepszono wydajność części towarzyszących węzłów pomocniczych.

1.5. Pomiar O₃ – fotometria UV

a) opis techniczny

Przy tej metodzie wykorzystywana jest właściwość ozonu do pochłaniania promieniowania UV o długości fali 253,7 nm. Na zasadzie prawa absorpcji Lamberta-Beera, stopień absorpcji promieniowania UV jest proporcjonalny do stężenia ozonu. Tę zależność obrazuje poniższe równanie:

$$\frac{I}{I_0} = e^{-Klc}$$

gdzie:

I – intensywność promieniowania UV po przejściu przez badaną próbkę,

I₀ - intensywność promieniowania UV po przejściu przez próbkę niezawierającą ozonu,

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

K – współczynnik absorpcji,

l – długość drogi optycznej,

c – stężenie ozonu

Stężenie ozonu w badanej próbce wyznacza się w odniesieniu do absorpcji promieniowania tej samej próbki niezawierającej ozonu. Na jednym z etapów pomiaru tą metodą ozon musi być usunięty z próbki, ponieważ wiele innych substancji znajdujących się w próbce również ma właściwość absorpcji promieniowania UV. Usunięcie ozonu pozwala zatem na uzyskanie wiarygodnego wyniku. Proces ten zachodzi przy użyciu specjalnych filtrów będących istotnym elementem analizatorów ozonu. Wraz ze wzrostem długości optycznej (komór absorpcyjnych) zwiększa się czułość urządzenia.

Analizatory ozonu konstruowane są w dwóch podstawowych wersjach: w analizatorach z jedną komorą pomiarową i jednym detektorem. Pomiary absorpcji promieniowania próbki badanego powietrza i próbki pozbawionej ozonu odbywają się na zmianę. Z kolei w analizatorach z dwiema komorami pomiarowymi i dwoma detektorami pomiary te zachodzą równolegle. Powietrze do analizy pobierane jest do czerpni zlokalizowanych na wysokości 2,5 do 4 m nad powierzchnią gruntu. Analizatory ozonu muszą być umieszczone w klimatyzowanych kontenerach, w których temperatura wynosi ok. 20-23°C.

Pomiary zanieczyszczenia ozonem mają największe znaczenie w sezonie letnim, ponieważ przy promieniowaniu słonecznym, wysokiej temperaturze i dużym stężeniu innych zanieczyszczeń powstaje najwięcej ozonu. Dlatego pomiary wykonywane są od 1 kwietnia do 30 września i w tym okresie na portalu GIOŚ codziennie w godzinach porannych publikowane są trzydniowe prognozy zanieczyszczenia ozonem.

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien



Ryc. 5 Analizator O₃ działający w oparciu o metodę fotometrii UV (źródło: <https://powietrze.gios.gov.pl/>)

b) wady i zalety

Metoda jest powszechnie uznawana za standardową i stosowaną w wielu laboratoriach badawczych. Umożliwia wykrycie ozonu nawet w niskich stężeniach i jest odporna na zakłócenie przez wiele czynników. Pomiar tą metodą odbywa się w czasie rzeczywistym. Sprzęt musi być jednak regularnie kalibrowany, a lampy UV okresowo wymieniane. Jest też stosunkowo drogi. Na dokładność pomiarów mogą jednak wpływać takie czynniki jak wysoka wilgotność lub obecność pyłów.

c) ocena przydatności

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

Fotometria UV jest standardową metodą referencyjną zgodnie z polskimi i europejskimi normami (PN-EN 14625:2013-02 Powietrze atmosferyczne – Standardowa metoda pomiaru stężenia ozonu z wykorzystaniem fotometrii w nadfiolecie). Jest powszechnie stosowana w automatycznych stacjach pomiarowych. Ponadto wykorzystywana jest w zakładach przemysłowych, takich jak elektrownie, ciepłownie i huty do kontroli emisji m.in. O₃ w celu zapewnienia zgodności z przepisami ochrony środowiska. Służy też do kontroli jakości powietrza w halach produkcyjnych zakładów chemicznych czy monitoringu procesów technologicznych przy analizie poziomów substancji chemicznych. Pomiary fotometrii UV są też pomocne przy optymalizacji procesów oczyszczania spalin w instalacjach przemysłowych.

d) sposoby eliminacji

Ponieważ ozon troposferyczny jest zanieczyszczeniem wtórnym powodowanym głównie reakcjami fotochemicznymi związków azotu oraz obecnością lotnych związków organicznych, działania redukujące ten składnik w powietrzu pokrywają się ze sposobami eliminacji wyżej wymienionych substancji.

2. Pozostałe metody

2.1 FTIR - Fourier Transform Infrared Spectroscopy

a) opis techniczny

FTIR, czyli spektroskopia w podczerwieni z transformacją Fouriera, jest uniwersalną metodą do pomiaru gazów w powietrzu, takich jak NO_x, SO₂, CO, CO₂, CH₄. Opiera się na zasadzie absorpcji promieniowania podczerwonego przez cząsteczki gazu, co prowadzi do wzbudzenia ich drgań i obrotów. Każdy gaz ma unikalne widmo absorpcyjne.

W celu przeprowadzenia pomiaru tą metodą emitowany jest szeroki zakres promieniowania podczerwonego. Wiązka promieniowania dzielona jest na dwie części, które w zależności od różnicy dróg optycznych, ulegają interferencji. Powstaje wówczas charakterystyczny sygnał w postaci interferogramu. Próbkę powietrza przepływa przez komorę, przez którą przechodzi też promieniowanie IR, które jest częściowo pochłaniane przez cząsteczki gazów. Natężenie

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

promieniowania rejestrowana jest po przejściu przez komorę. Interferogram przekształcany jest na dane w widmie absorpcji przy pomocy transformacji Fouriera. Uzyskane widmo absorpcji jest następnie porównywane z wzorcami właściwymi dla danych gazów. Intensywność linii absorpcyjnych jest proporcjonalna do stężenia badanych gazów. Aparatura do przeprowadzenia pomiaru tą metodą składa się z: źródła promieniowania podczerwonego, zwykle w zakresie od 2,5 μm do 25 μm , interferometru Michelsona dzielący wiązkę promieniowania, komory pomiarowej, przez którą przechodzi badana próbka powietrza i promieniowanie, detektora promieniowania, zwykle chłodzonego kriogenicznie i systemu przetwarzania danych. Czułość tego systemu jest wysoka i pozwala na detekcję gazów w stężeniach rzędu ppb lub ppm. Rozdzielczość spektralna oscyluje w granicach 0,5–1 cm^{-1} , dzięki czemu możliwe jest rozróżnienie linii absorpcyjnych wielu gazów. Wyniki pomiaru uzyskiwane są bardzo szybko, od kilku sekund do kilku minut.

b) wady i zalety

Przy użyciu tej metody, dzięki szerokiemu zakresowi długości fal, można dokonywać pomiaru stężeń kilku gazów jednocześnie, a widma absorpcji pozwalają na dokładne rozróżnienie gazów o podobnych właściwościach. Metoda dostarcza wyniki analizy natychmiast po wykonaniu pomiaru, nadaje się więc do automatycznego i ciągłego pomiaru jakości powietrza. Opiera się wyłącznie na pomiarze promieniowania podczerwonego, nie są więc konieczne odczynniki chemiczne. Metoda ta jest również odporna na zakłócenia spowodowane innymi składnikami badanej próbki powietrza. Urządzenia używane przy tej metodzie, a także ich serwisowanie, są jednak bardzo kosztowne. Wynika to z technologii, która jest wysoce zaawansowana, a układy optyczne i elektroniczne są bardzo złożone. Aby utrzymać wysoką dokładność uzyskiwanych wyników, sprzęt musi być regularnie kalibrowany i konieczne jest stosowanie gazów wzorcowych.

c) ocena przydatności metody

Niewątpliwą przewagą tej metody nad innymi metodami jest możliwość jednoczesnego pomiaru kilku gazów w badanej próbce powietrza. Jednak z uwagi na kosztowność i złożoność technologii tej metody, nie jest ona powszechnie stosowana do pomiaru stężenia gazów.

d) przykłady zastosowania metody

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

Z uwagi na wszechstronność tej metody i możliwość wykorzystania w różnych badaniach przyrząd do pomiaru metodą FTIR jest na wyposażeniu wielu jednostek badawczych, m.in. Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie czy Uniwersytetu Rzeszowskiego.

2.2. Sensory niskokosztowe (Low-Cost Sensors)

a) opis techniczny

Sensor jest urządzeniem przetwarzającym informacje chemiczne w sygnał użyteczny analitycznie. Wśród bodźców, na jakie mogą reagować czujniki zalicza się zmiany współczynnika odbicia światła, ruch, powstanie substancji chemicznej, zmianę masy, zmianę pola magnetycznego czy elektrycznego, zmianę barwy i in. Pod względem mechanizmu reakcji wykrywającej sensora, można podzielić je na elektrochemiczne, elektryczne, grawimetryczne, termometryczne, magnetyczne, biologiczne, optyczne.

Sensoryczne czujniki niskokosztowe są tanimi, przenośnymi urządzeniami mierzącymi parametry jakości powietrza, takie jak stężenie PM2.5, PM10, O₃, NO₂, czy CO. Czujnik do pomiaru stężenia pyłów zawieszonych może być optyczny lub laserowy, a do analizy gazów – elektrochemiczny. Pomiar pyłów odbywa się przy zastosowaniu laserowej wiązki światła przechodzącej przez próbkę powietrza i rejestracji rozproszonego światła przez fotodetektor. Stężenie pyłów kalkulowane jest na podstawie intensywności i kąta rozpraszania światła. Z kolei gazy reagując na elektrody umieszczone w sensorze elektrochemicznym, generują prąd proporcjonalny do ich stężenia.

Półprzewodnikowy sensor gazowy służy do detekcji lotnych związków organicznych. Dodatkowy moduł mierzący wilgotność i temperaturę pozwala na skorygowanie wpływu warunków atmosferycznych na pomiar. Do przetwarzania danych i sterowania pracą sprzętu służy procesor mikroelektroniczny. Przy przesyłaniu uzyskanych danych korzysta się z modułu transmisji danych, np. Wi-Fi. Sprzęt działa przy zasilaniu sieciowym lub poprzez wmontowany akumulator. Wyniki pomiarów podlegają automatycznej analizie i są dostarczane w czasie rzeczywistym.

b) wady i zalety

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

Nie bez powodu nazwa tego urządzenia brzmi „sensor niskokosztowy”, gdyż niska cena jest jego największą zaletą i oscyluje w granicach od kilkuset do kilku tysięcy złotych. Dzięki temu sensory są powszechnie dostępne i wykorzystywane przez społeczności lokalne czy organizacje pozarządowe przeprowadzające niezależne od instytucji państwowych pomiary jakości powietrza. Dostarczają dane w czasie rzeczywistym i przy ich użyciu można stworzyć gęstą sieć pomiarową. Czujniki są niewielkie i przenośne, mogą być montowane w rozmaitych lokalizacjach, np. przy budynkach czy latarniach ulicznych. Możliwa jest integracja czujników z siecią IoT (Internet of Things), co pozwala na automatyczne zbieranie, analizę i publikację danych.

Pojawia się jednak szereg wątpliwości związanych z wiarygodnością urządzeń tego typu. Pomiary prowadzone przez czujniki sensoryczne są mniej dokładne niż te prowadzone przez stacje referencyjne. Wyniki dostarczane przez czujniki mogą być mniej precyzyjne i obarczone dużym błędem.

Są też bardzo podatne na warunki środowiskowe, np. temperaturę, wilgotność czy ciśnienie, co w konsekwencji może doprowadzić do uzyskania nieprawidłowego wyniku. Niskokosztowe czujniki sensoryczne mają też znacznie krótszą żywotność niż profesjonalne urządzenia i wymagają też częstej wymiany filtrów. Aby nie dopuścić do uzyskania nieprawdziwych wyników konieczna jest regularna kalibracja względem metod referencyjnych, prowadzona w określonych interwałach czasowych. Urządzenia te mają zwykle wąskie zakresy pomiarowe i mierzą jedynie określone przez producenta rodzaje zanieczyszczeń. W celu prowadzenia pomiarów czujniki te muszą być podłączone do źródeł zasilania, co powoduje, że nie są użyteczne w miejscach odległych bez niezbędnej infrastruktury. Dane z pomiarów mogą być trudne do zestawienia z wynikami uzyskanymi przy pomiarach metodami referencyjnymi, zwłaszcza jeśli nie została przeprowadzona kalibracja sprzętu. Ze względu na brak standaryzacji trudne może być porównanie wyników pomiaru przeprowadzonych przez różne modele czujników.

c) ocena przydatności

Niskokosztowe czujniki sensoryczne są przydatnym narzędziem do monitorowania jakości powietrza w sytuacjach konieczności uzyskania danych w krótkim czasie czy ryzyka przekroczenia norm jakości powietrza i niezbędnej szybkiej reakcji. Jednak aby uniknąć błędów pomiarowych, należy koniecznie regularnie je kalibrować.

Przy konieczności utrzymania dużej precyzji i zgodności z obowiązującymi normami, np. w instytucjach państwowych, badaniach naukowych, należy uwzględniać jedynie pomiary referencyjne – wyniki uzyskane przy pomiarze czujnikami mogą być jedynie danymi

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

uzupełniającymi standardowe pomiary. Z uwagi na fakt, że kalibracja mogła być prowadzona przez producenta danego czujnika w innych warunkach niż podczas pomiarów po nabyciu sprzętu, należy go ponownie kalibrować w docelowym środowisku pomiarowym.

d) przykłady zastosowania

Czujniki sensoryczne są wykorzystywane na szeroką skalę w wielu polskich miastach w ramach Polskiego Alarmu Smogowego. W ostatnim czasie wprowadzono takie czujniki w Górnośląsko-Zagłębiowskiej Metropolii w celu pomiaru stężenia NO₂ generowanego przez transport samochodowy.

2.3. LiDAR (Light Detection and Ranging)

a) opis techniczny

Dane pomiarowe LiDAR pozyskuje się z lotniczego skanowania laserowego ALS (Airborne Laser Scanning). Odwzorowują one teren w formie chmury punktów pomiarowych o współrzędnych XYZ. Pliki zawierające dane LiDAR zawierają wspomniane współrzędne, a także m.in. dane o klasach punktów i intensywności odbicia sygnału.

W przypadku pomiaru jakości powietrza emitowana wiązka lasera odbijana jest przez cząstki pyłów lub gazów. Odbicie wiązki lasera rejestrowane jest przez detektor. Analiza odbitego sygnału pozwala na mapowanie rozkładu pyłów zawieszonych, zanieczyszczeń gazowych, a także dynamiki rozmieszczenia tych zanieczyszczeń. Technologia wykorzystuje różne długości fal do analizy pochłaniania i rozpraszania światła, dzięki czemu można badać różne rodzaje zanieczyszczeń w tym samym czasie, a także analizować warunki meteorologiczne.

b) wady i zalety

Do głównych zalet technologii LiDAR należy precyzyjne mapowanie w wymiarze przestrzennym o dużym zasięgu, co poza określeniem stężenia poszczególnych pyłów lub gazów umożliwia ich analizę rozprzestrzeniania się. Pomiary wykonywane są w czasie rzeczywistym, możliwa jest też

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

analiza warunków meteorologicznych. Nie ma konieczności pobierania próby powietrza i ryzyka jej zanieczyszczenia. Wadą technologii jest bardzo wysoki koszt urządzeń i konieczność jego profesjonalnej obsługi. Przy pomiarze należy uwzględniać warunki meteorologiczne, ponieważ wyniki mogą być zakłócone np. przez mgłę czy opady, które rozpraszają emitowane światło lasera. Technologia pomiaru gazów wymaga dokładnego dostosowania długości fali do badanego zanieczyszczenia, a jest to bardzo złożony proces. Konieczna jest też kalibracja urządzenia i użycie złożonych modeli matematycznych przy interpretacji danych. Systemy LiDAR lokalizowane są zwykle w jednym miejscu – mobilny monitoring jest znacznie droższy i rzadziej stosowany. Niezbędne jest też użycie zasilania o dużej mocy, aby umożliwić działanie laserów.

c) ocena przydatności metody

LiDAR jest bardzo przydatnym narzędziem do precyzyjnego i szybkiego monitorowania jakości powietrza w wymiarze przestrzennym. Jednak ze względu na bardzo wysokie koszty pomiaru tą technologią, znajduje ona zastosowanie w badaniach naukowych i wysokobudżetowych projektach. Przy jej użyciu należy także uwzględniać warunki atmosferyczne, które mogą zakłócić pomiar oraz konieczność kalibracji sprzętu.

d) przykłady zastosowań

Technologia LiDAR jest wykorzystywana głównie do sporządzania Numerycznych Modeli Terenu (NMT) oraz Numerycznych Modeli Pokrycia Terenu (NMPT) i ich aktualizacji przez Główny Urząd Geodezji i Kartografii. Dane są udostępniane na stronie geoportal.gov.pl.

2.4. Technologia satelitarna

a) opis techniczny

Zastosowanie tej technologii w monitoringu jakości powietrza polega na użyciu czujników teledetekcyjnych umieszczonych na satelitach do pomiaru stężeń zanieczyszczeń. Pomiar odbywa się na zasadzie zdalnego monitorowania globalnego i lokalnego rozkładu zanieczyszczeń atmosferycznych, dostarczając dane w szerokiej skali przestrzennej. Dane uzyskiwane są z

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

pomiarów promieniowania elektromagnetycznego pochłanianego, rozpraszanego lub emitowanego przez cząstki i gazy.

Technologia satelitarna działa na zasadzie pomiaru promieniowania elektromagnetycznego w różnych długościach fal odpowiadających: promieniowaniu ultrafioletowemu – przy wykrywaniu gazów takich jak np. SO₂ czy O₃, promieniowaniu widzialnemu – przy detekcji pyłów, promieniowaniu podczerwonemu – przy detekcji gazów cieplarnianych oraz mikrofalom – przy analizie zanieczyszczeń przy zachmurzeniu. Do pomiaru używane są spektrometry i spektrofotometry, radiometry i LiDAR satelitarny. Dzięki zastosowaniu tej technologii można mierzyć stężenie wielu rodzajów zanieczyszczeń: gazów (CO, CO₂, SO₂, NO₂ i innych), pyłów zawieszonych, a także określać właściwości meteorologiczne.

b) wady i zalety

Technologia jest niezwykle przydatna przy pobieraniu danych dla całej planety, włącznie z terenami o ograniczonej dostępności (np. obszarów polarnych). Pozwala też na długoterminowe analizy jakości powietrza, a także prowadzenie pomiaru praktycznie w czasie rzeczywistym obejmującego różne zanieczyszczenia i ich przemieszczanie się. Dane uzyskane przy pomiarze tą technologią są używane przy kalibracji niektórych prognostycznych modeli jakości powietrza. Ponadto pomiary są wykonywane całkowicie zdalnie.

Do wad należy zaliczyć brak możliwości dostarczenia szczegółowych informacji na poziomie lokalnym (np. w gęstej miejskiej zabudowie). Istotne są też warunki meteorologiczne, w których przeprowadzany jest pomiar - zachmurzenie, mgła czy duże zagęszczenie pyłów mogą stanowić przeszkodę przy pozyskiwaniu danych. Kolejnym mankamentem są koszty inwestycyjne technologii, które są nadzwyczajnie wysokie. Konieczna jest też kalibracja z metodami referencyjnymi, aby zagwarantować dokładność pomiarów. Pomiary satelitarne mają limitowany zakres wysokości i w przypadku pomiaru jakości powietrza są bardziej skuteczne dla zanieczyszczeń w górnych warstwach atmosfery. W sytuacji brakujących pomiarów satelitarnych może być konieczna interpolacja przy składaniu danych.

c) ocena przydatności

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

Technologia satelitarna jest niezwykle cenną metodą w monitoringu o skali globalnej, dostarczającą ogromny zakres danych. Znajduje zastosowanie przy globalnej analizie jakości powietrza, np. monitoringu przemieszczania się zanieczyszczeń między kontynentami czy analizie zakresu wpływu większych źródeł emisji, takich jak wybuchy wulkanów. Technologia ta nie nadaje się jednak do lokalnego monitoringu i wykrywania punktowych źródeł zanieczyszczeń. Wówczas niezbędne jest uzupełnienie danych o wyniki pomiarów ze stacji naziemnych.

d) przykład zastosowania

Krajowy program współpracy Serwisu Monitoringu Atmosfery Copernicus (CAMS), którego Instytut Ochrony Środowiska – Państwowy Instytut Badawczy (IOŚ-PIB) jest częścią, zapewnia integrację danych satelitarnych z modelami jakości powietrza. Efektem jest uzyskanie zbioru danych na temat stężenia zanieczyszczeń w całym kraju, a także w Europie. W ramach programu funkcjonuje m.in. geoportal, na którym na bieżąco są mapowane stężenia zanieczyszczeń, a także prognozy na kolejne dwa dni (https://cams.ios.edu.pl/geoportal/jakosc_powietrza/). Wśród mierzonych substancji znajdują się: SO₂, NO₂, O₃, PM₁₀, PM_{2,5}.

2.5. System IoT (Internet of Things)

a) opis techniczny

Technologie bazujące na Internet of Things (IoT) w monitoringu jakości powietrza są oparte na sieci połączonych czujników zbierających, przetwarzających i dostarczających dane o zanieczyszczeniu powietrza w czasie rzeczywistym. Rozproszona infrastruktura i zdalna komunikacja zapewniają skuteczny monitoring na poziomie lokalnym i regionalnym.

System IoT składa się z:

- niskokosztowych czujników mierzących stężenia zanieczyszczeń,
- platform komunikacyjnych umożliwiających łączenie się sensorów z serwerami, i współpracy urządzeń, w wyniku której powstaje mapa jakości powietrza,
- chmury obliczeniowej, do której przesyłane są dane, a następnie analizowane przy pomocy algorytmów przetwarzania danych, a także uczenia maszynowego,
- interfejsu użytkownika – finalnie wyniki pomiarów docierają do użytkowników za pośrednictwem np. aplikacji mobilnych lub stron internetowych.

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

System agreguje i koreluje dane z różnych lokalizacji aby zidentyfikować źródła zanieczyszczeń i wygenerować prognozy. Używa też big data i algorytmów uczenia maszynowego w celu wytworzenia prognoz i w razie potrzeby alertów w czasie rzeczywistym. Sensory systemu mogą tworzyć gęstą sieć, przez co możliwy jest szczegółowy monitoring na danym obszarze (np. osiedlu).

b) wady i zalety

Wśród zalet tego systemu należy wymienić niski koszt czujników i możliwość tworzenia przy ich użyciu gęstej sieci monitoringu. Ponadto wyniki pomiarów zapewniają uzyskanie szczegółowego obrazu jakości powietrza na danym obszarze. Są one dostarczane w czasie rzeczywistym, co pozwala na szybką reakcję w razie przekroczenia norm jakości powietrza. Sensory mogą być też łatwo instalowane w miejscach oddalonych od stacji pomiarowych i są przenośne. System może być powiązany z innymi technologiami, np. GIS.

W związku z zastosowaniem niskokosztowych czujników, do wad należy niska dokładność pomiarów w stosunku do metod referencyjnych, a także ryzyko wpływu zewnętrznych czynników na wyniki pomiaru, np. wilgotności czy zakłóceń elektromagnetycznych. Żywotność sensorów jest krótka, należy też mieć na uwadze konieczność regularnej kalibracji. Niezbędne są też narzędzia do przetwarzania i przechowywania dużych ilości danych, a także stosowanie odpowiednich zabezpieczeń systemu. Sensory muszą mieć też stały dostęp do sieci i zasilania. Dla niektórych czujników wykrycie niskich stężeń zanieczyszczeń może być niemożliwe.

c) ocena przydatności

System IoT w pomiarze jakości powietrza jest innowacyjnym niskokosztowym narzędziem, przy pomocy którego można tworzyć gęstą sieć monitoringu w lokalizacjach, gdzie brakuje innych stacji pomiarowych. Z uwagi na konieczność zastosowania odpowiedniej infrastruktury mogą być instalowane głównie w miastach. Wdrożenia systemu IoT w różnych lokalizacjach, np. przy budynkach użyteczności publicznej angażuje społeczność i zwraca uwagę na problemy zanieczyszczenia powietrza. Liczne ograniczenia sensorów powodują jednak konieczność odniesienia wyników do tych uzyskanych przy użyciu metod referencyjnych.

d) przykład zastosowania

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

W Katowicach wdrożono monitoring jakości powietrza oparty na IoT, będący własnością samorządu terytorialnego. Zagęszczenie czujników tworzących system wynosi 0,77/km². Dla mieszkańców dostępny jest Showroom IoT w Katowicach, gdzie można poznać bliżej tę technologię. Czujniki zostały zamontowane w ramach europejskiego projektu AWAIR, poza tym zainstalowano ponad 150 ekranów wyświetlających bieżące dane: stężenie pyłów zawieszonych, wilgotność, temperaturę i ciśnienie. Czujniki zostały zamontowane m.in. w budynkach użyteczności publicznej. Choć projekt przyczynia się do rozpowszechnienia informacji nt. bieżącej jakości powietrza, podkreślono, że dane pozyskiwane z tych czujników mają charakter wyłącznie poglądowy.

2.6 Bezzałogowe statki powietrzne (BSP, drony)

a) opis techniczny

Drony służące do pomiaru jakości powietrza mogą mieć wbudowane czujniki gazowe, systemy sztucznej inteligencji lub inne technologie, umożliwiające pomiary, wykrywanie i rejestr źródeł zanieczyszczeń powietrza. W tym celu mogą być wykorzystywane na dwa podstawowe sposoby:

-pobranie próbki powietrza przez dron, po czym jest ona analizowana w laboratorium naziemnym. Takie statki wyposażone są w poborniki powietrza, jak np.:

- filtry teflonowe i kwarcowe do poboru próbek z pyłem zawieszonym,
- workoczki tedlarowe – do poboru próbek gazowych,
- pułapki adsorpcyjne (np. na węglu aktywnym) – do badania lotnych związków organicznych (VOC),
- filtry elektrostatyczne – pobieranie próbek do analizy laboratoryjnej.

-przy użyciu wbudowanych czujników, dron wykonuje pomiar on-line, a pozyskane dane przesyłane w czasie rzeczywistym.

- czujniki gazowe:
 - oparte na metodzie NDIR (Non-Dispersive Infrared Sensors),
 - elektrochemiczne czujniki gazów – NO₂, SO₂, CO, O₃,
 - czujniki półprzewodnikowe – pomiar lotnych związków organicznych i gazów toksycznych.
- czujniki pyłów zawieszonych:

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

- z technologią LiDAR (Light Detection and Ranging), umożliwiającą mapowanie rozkładu zanieczyszczeń w układzie przestrzennym,
- czujniki laserowe i optyczne – służące do pomiaru stężenia pyłów.

Pod względem konstrukcji drony dzieli się na:

-wielowirnikowce – bardzo stabilne urządzenia ze zdolnością do „zawisnięcia” w powietrzu. Znajdują zastosowanie w precyzyjnym pobieraniu próbek powietrza. Ich czas lotu jest jednak krótki i trwa do ok. godziny,

-stałopłaty – nie są tak precyzyjne jak wielowirnikowce, jednak mogą się przemieszczać na dużych obszarach, a lot trwa dłużej,

-hybrydowe – łączą cechy wyżej wymienionych rodzajów dronów.

Zaawansowane BSP do pomiaru jakości powietrza są wyposażone w dodatkowe systemy:

-GPS RTK (Real-Time Kinematic) – umożliwiający precyzyjne pozycjonowanie urządzenia,

-systemy autonomicznego lotu AI – zdolne do optymalizowania trasy z uwzględnieniem bieżącego poziomu zanieczyszczeń,

-łączność np. 5G, integracja z IoT – przesyła dane w czasie rzeczywistym,

-integracja z danymi satelitarnymi – dostarczają kompleksowe dane.

b) wady i zalety

Największą zaletą opisywanych urządzeń jest mobilność i możliwość dotarcia do trudno dostępnych obszarów. Są też nieocenionym wsparciem strażników i urzędników, na których spoczywa obowiązek kontroli palenisk. Pomiaru mogą być dokonane w układzie przestrzennym i na różnych wysokościach. Urządzenia są stale udoskonalane, a nowe technologie pozwalają na wzbogacenie pracy urządzenia o dodatkowe funkcje. Są też stosunkowo tanie w porównaniu do klasycznych metod pomiarowych. Drony z wbudowanymi systemami pomiaru jakości powietrza badają stężenia zanieczyszczeń w czasie rzeczywistym. Urządzenie działa na baterie, w związku z czym czas lotu jest ograniczony i w zależności od modelu wynosi od 30 do 120 minut. Wyzwaniem jest też dobór odpowiednich czujników mierzących adekwatny zakres zanieczyszczeń. Praca BSP

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

musi być też stabilna, odporna na zakłócenia zewnętrzne, takie jak warunki atmosferyczne czy zakłócenia elektromagnetyczne, a podczas pomiaru utrzymana stała pozycja. Konieczne jest też przestrzeganie regulacji prawnych dotyczących korzystania z bezzałogowych statków powietrznych i przelotu nad różnymi obiektami oraz ochrona danych zebranych przez urządzenia.

c) ocena przydatności

Bezzałogowe statki powietrzne są już od kilku lat z powodzeniem stosowane w ochronie jakości powietrza przez Straż Miejską w wielu regionach. Na szczególną uwagę zasługują wersje dronów wykonujące pomiary metodą NDIR, a także pobierające próbki do badań w laboratoriach naziemnych. Działanie czujników w powszechnie stosowanych dronach musi być zgodne z metodami referencyjnymi, a także obowiązującymi regulacjami prawnymi. Są niewątpliwie cennym wsparciem urzędów, gdyż w krótkim czasie dostarczają wstępnej analizy jakości powietrza z danego obszaru, dzięki której, w razie podejrzenia nieprawidłowości, urzędnicy mogą skontrolować konkretne obiekty.

Zastosowanie metody takiej jak BSP pozwala na ograniczenie ingerencji ludzkiej i brak konieczności kontroli urzędników w każdym obiekcie. Ponadto możliwa jest też natychmiastowa reakcja w razie wykrycia źródła emisji zanieczyszczeń przekraczających dopuszczalne normy. Najnowsze technologie są cennym dodatkiem zapewniającym sprawniejszy przebieg pomiarów i dostarczenie dokładniejszych wyników. BSP są ważnym wyposażeniem urzędów w kontroli jakości powietrza, jednak stanowią one komplementarne narzędzie przy monitorowaniu zanieczyszczeń.

d) przykłady zastosowania

W ramach obszernego projektu „Górnośląskie innowacje antysmogowe” władze Katowic wykorzystują bezzałogowe statki powietrzne w celu badania składu chemicznego dymu pochodzącego z gospodarstw domowych. Laserowy licznik cząstek stałych wykrywa w dymie etanol, amoniak, chlorek wodoru, formaldehyd, a także mierzy poziomy PM10, PM2,5 i PM1. Dane te pomagają ustalić czy w danym gospodarstwie spalano odpady lub niskojakościowe paliwa, co z kolei daje podstawę Straży Miejskiej do kontroli paleniska.

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

2.6 Biomonitoring

a) opis techniczny

Biomonitoring jest metodą oceny stanu środowiska polegającą na obserwacji występowania lub analizy reakcji organizmów żywych (bioindykatorów) bytujących na danym terenie. Przy takim badaniu kontrolowana jest reakcja roślin, zwierząt lub grzybów na obecność i stężenie zanieczyszczeń. Biomonitoring może być w formie pasywnej, gdzie obserwuje się naturalnie występujące organizmy na danym obszarze lub aktywnej, przy której przemieszcza się bioindykatory na badany teren.

Bioindykatorami przy pomiarze jakości powietrza są najczęściej porosty rosnące na drzewie (epifity). Są to zlichenizowane grzyby (symbioza glonów i grzybów) nie wykształcające korzeni, dlatego składniki niezbędne do życia pobierają z powietrza. Są zatem bardzo wrażliwe na zanieczyszczenia powietrza, zwłaszcza SO₂, którego zbyt wysokie stężenie powoduje zanik chlorofilu. W przypadku dużego zanieczyszczenia obserwowane są jedynie porosty o skorupiastej plesze. W najbardziej czystszych warunkach obecne są porosty o plechach krzaczkowatych. Mają one bardzo wyraźne progi tolerancji na zanieczyszczenia, dlatego opracowano skalę zanieczyszczeń powietrza, dzięki której można wskazać stopień skażenia środowiska w zależności od obserwowanych porostów.

Biomonitoring odbywa się najczęściej poprzez określenie różnorodności i liczebności porostów. Z kolei poprzez badanie składu chemicznego porostów można ocenić pochodzenie zanieczyszczenia, które określa się w oparciu o skład izotopowy siarki i ołowiu, zawartych w aerozolu w powietrzu atmosferycznym.

Nowe badania naukowe wykazują, że bardzo dobrym indykatorem zanieczyszczeń powietrza są również pajęczyny tkane przez pająki z rodziny lejkowcowatych, które występują powszechnie i są aktywne przez cały rok. Jednak w czasie powstawania niniejszego opracowania w biomonitoringu wykorzystywane są głównie rośliny, co zostało ujęte w poniższych standardach:

EN 16413:2014 Powietrze otoczenia - biomonitoring z porostami - ocena różnorodności epifitycznych porostów

EN 16414:2014 Powietrze atmosferyczne - biomonitoring z mchami - Akumulacja zanieczyszczeń atmosferycznych w mchach gromadzonych in situ: od zbierania do przygotowania próbek

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

EN 16789:2016 Powietrze atmosferyczne - biomonitoring z roślinami wyższymi - metoda standaryzowanej ekspozycji tytoniu

b) wady i zalety

Przy metodzie biomonitoringu nie jest potrzebna żadna technologia, a rolę czujników pełnią żywe organizmy. Jakość powietrza może być kontrolowana tą metodą na odległych obszarach bez odpowiedniej infrastruktury. Niektóre technologie mogą nie wykryć nieznacznych zmian składu chemicznego powietrza, które mogą wpływać na żywe organizmy. Biomonitoring pozwala też na ocenę wpływu zanieczyszczeń na stan środowiska po wielu latach, gdyż zanieczyszczenia mogą się kumulować w bioindykatorach. Użycie tej metody nie wymaga też dużych nakładów finansowych.

Biomonitoring pozwala na uzyskanie jedynie jakościowych danych lokalnych – do ilościowego określenia stężeń zanieczyszczeń na większym obszarze możliwe konieczne jest użycie innych metod. Poza zanieczyszczeniami należy też uwzględnić inne czynniki, które mogą wpłynąć na organizmy żywe. Prowadzenie obserwacji jest też czasochłonne, stąd wyniki są dostarczane z opóźnieniem.

c) ocena przydatności

Biomonitoring jest bardzo użyteczną metodą, z uwagi na swoje unikalne zalety. Stanowi cenne źródło danych, zwłaszcza w terenach trudno dostępnych. Obowiązek sporządzania raportów opartych na biomonitoringu wynika z konieczności realizowania planów ochrony parków narodowych, krajobrazowych i rezerwatów przyrody, a także przygotowywania ocen oddziaływania na środowisko. W przypadku sporządzania raportów o stanie powietrza, z powodu braku wyników ilościowych, biomonitoring stanowi metodę komplementarną do bardziej precyzyjnych technik. Jest jednak ważnym wskaźnikiem, który warto uwzględnić przy monitorowaniu jakości powietrza.

d) przykłady zastosowania

Przykładem biomonitoringu pasywnego jest praca słowackiego zespołu badawczego, który użył kilku gatunków mszaków i porostów do pomiaru jakości powietrza w jednym z parkingów podziemnych w Preszowie (Demková i in. 2018). W badaniu wykorzystano mchy: *Pleurozium* spp., *Rhytidiadelphus* spp., *Polytrichum* spp. i porost *Pseudevernia furfuracea* (L.) Zopf. W takich

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

badaniach wyznaczany jest względny współczynnik akumulacji, który wskazuje na poziom zanieczyszczenia szkodliwymi substancjami pochłanianymi przez mchy i porosty.

$$RAF = (C_{\text{exposed}} - C_{\text{initial}}) / C_{\text{initial}}$$

gdzie: C_{exposed} – stężenie początkowe, C_{initial} – stężenie po ekspozycji

Analiza laboratoryjna wyeksponowanych bioindykatorów daje pełen obraz zanieczyszczeń występujących na danym obszarze.

3. Sposoby eliminacji zanieczyszczeń na obszarze wsparcia projektu – odnawialne źródła energii (OZE)

Poza sposobami eliminacji poszczególnych zanieczyszczeń opisanych w powyższych rozdziałach, poniżej przedstawiono przykład szczególnie cennego OZE, jakim jest energia geotermalna. Jej spożytkowanie eliminuje emisje wszelkiego rodzaju zanieczyszczeń do atmosfery.

Energia geotermalna jest energia ciepłą Ziemi zmagazynowaną w skałach i wodach w porach i szczelinach skalnych na różnych głębokościach. Jest uznawana za najczystsze odnawialne źródło energii o niewyczerpalnych zasobach. Do jej zalet zalicza się ekonomiczna opłacalność, brak generowania jakichkolwiek emisji czy odpadów, niezależność od pogody, a także stała dyspozycyjność. Poza tym użytkowanie wód geotermalnych jest bezpieczne, akceptowalne społecznie i nie zakłóca krajobrazu.

Według licznych opracowań naukowych, Polska ma duży potencjał w wykorzystaniu ciepła ziemi do celów energetycznych. Eksploatacja wód geotermalnych jest jednak opłacalna tylko w określonych miejscach. Możliwości wykorzystania zasobów energii geotermalnych dostrzeżono także na Słowacji, gdzie działają dwie elektrownie geotermalne (na obszarze wsparcia projektu: Žiar nad Hronom i Prešov).

Do regionów na terenie Polski, w których znajdują się najlepsze warunki do rozwinięcia energetyki opartej na geotermii, zalicza się m.in. Podkarpacie. Na Podhalu są największe eksploatowane złoża energii geotermalnej w kraju. W poprzednich latach Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej uruchomił programy dotacyjne na realizację projektów geotermalnych dla samorządów i planowana jest ich kontynuacja. Jednak wciąż wykorzystanie potencjału wód geotermalnych jest w Polsce niewielkie.

Na obszarze wsparcia projektu po stronie Polski działa PEC Geotermia Podhalańska S.A., która wykorzystuje zasoby energii geotermalnej do centralnego ogrzewania i przygotowywania

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

cieplej wody użytkowej, klimatyzacji, a także rekreacji i balneologii. Do jej sieci ciepłowniczej są stale dołączane kolejne obiekty, co przekłada się na wyraźny spadek zużycia paliw stałych do ogrzewania. Ma to szczególne znaczenie na Podhalu – regionie o szczególnych walorach przyrodniczych. Szacuje się, że projekt geotermalny przyczynił się do redukcji emisji SO₂ w tej lokalizacji o około 68%. Z kolei emisję CO₂ zredukowano do poziomu ok. 51 tys. ton rocznie w 2023 roku (geotermia.pl).

Spis literatury

Adamski, M., Dąbrowska, A., Dąbrowski A. & Konieczka, A. (2022) Analytics of air samples collected with an apparatus coupled to UAV in air quality monitoring. *Signal Processing: Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications (SPA)*, Poznan, Poland, 141-145.

Berner, B. & Chojnacki J. (2017) Monitorowanie zanieczyszczeń środowiska za pomocą dronów. *Autobusy* (7-8) 57-60.

Bielawska, M. (2023) Analiza przestrzennego rozkładu stężeń zanieczyszczeń powietrza w aglomeracji gdańskiej z wykorzystaniem geograficznych systemów informacji. Praca doktorska, Politechnika Gdańska.

Chwistek, Z. & M., Dąbrowski M.W. (2023) Testy laboratoryjnego układu do badania katalizatorów przeznaczonych do redukcji emisji tlenków azotu. Praca inżynierska, Akademia Górniczo-Hutnicza

Demková, L., Árvay, J., Bobul'ská, L. & Oboňa, J. (2018) The risk elements biomonitring in the ambient air of an underground parking lot. *Polish Journal of Natural Sciences* 33 (4) 545–559.

Dubey, R., Telles, A., Nikkel, J., Cao, C., Gewirtzman, J., Raymond, P. A., & Lee, X. (2024) Low-Cost CO₂ NDIR Sensors: Performance Evaluation and Calibration Using Machine Learning Techniques. *Sensors* 24 (17) 5675.

Fontijn A. (1976) Chemiluminescence Techniques in Air Pollutant Monitoring. In: Wehry, E.L. (eds) *Modern Fluorescence Spectroscopy. Modern Analytical Chemistry, vol 1. Springer, Boston, MA.*

Frączkowski T. (2017) Monitoring pyłu zawieszonego w atmosferze (cz. I) *Lab* 22 (2) 32-36.

Główny Inspektorat Ochrony Środowiska (2025) Portal Jakość Powietrza <https://powietrze.gios.gov.pl/> (dostęp: 24.01.2025)

Grupa Azoty (2022) Uruchomienie instalacji odsiarczania spalin w Grupie Azoty S.A. <https://grupaazoty.com/>

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

Jakowiuk A., Urbański P., Świstowski E., Machaj B., Pieńkos J., Kowalska E. (2008) Metrological features of a beta absorption particulate air monitor operating with wireless communication system. *NUKLEONIKA*, 53 (Supplement 2), 37–42.

Kapuściński, J. & Rodzoch, A. (2010) Geotermia niskotemperaturowa w Polsce i na świecie. Stan aktualny i perspektywy rozwoju. Uwarunkowania techniczne, środowiskowe i ekonomiczne. Ministerstwo Środowiska, Warszawa.

Kępińska, B. (2011) Energia geotermalna w Polsce – stan wykorzystania, perspektywy rozwoju. *Technika Poszukiwań Geologicznych Geotermia, Zrównoważony Rozwój (1–2)*, 7-17.

Komisja Europejska (2021) Decyzja wykonawcza Komisji (UE) 2021/2326 z dnia 30 listopada 2021 r. ustanawiająca konkluzje dotyczące najlepszych dostępnych technik (BAT) w odniesieniu do dużych obiektów energetycznego spalania zgodnie z dyrektywą Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/75/UE. Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej.

Kowalewicz A. (2000) Podstawy procesów spalania. Wyd. Naukowo-Techniczne, Warszawa

Kowalik M., Zajemska M. (2013) Spalanie węgla kamiennego w powietrzu wzbogaconym tlenem a zanieczyszczenia. *Polityka Energetyczna*. 16 (2) 85-101.

Krajowy program współpracy - Monitoring Atmosfery Copernicus, Instytut Ochrony Środowiska – Państwowy Instytut Badawczy (2025) Geoportal. Jakość powietrza. https://cams.ios.edu.pl/geoportal/jakosc_powietrza/ (dostęp: 20.01.2025)

Łączek, A. (2008) Budowa i zastosowanie dronów. W: *Zastosowania nauki* 4, 112–114. Politechnika Rzeszowska.

Małopolska w zdrowej atmosferze. Jakość powietrza. <https://powietrze.malopolska.pl/jakosc-powietrza/> (dostęp: 20.01.2025)

Mendes, L.B.; Ogink, N.W.M.; Edouard, N.; Van Dooren, H.J.C.; Tinôco, I.D.F.F.; Mosquera, J. (2015) NDIR Gas Sensor for Spatial Monitoring of Carbon Dioxide Concentrations in Naturally Ventilated Livestock Buildings. *Sensors*, 15, 11239-11257.

Ministerstvo životného prostredia Slovenskej republiky. Slovenský hydrometeorologický ústav (2025) Spravodajstvo kvality ovzdušja.

Oil Sands Monitoring Program. 2020. Standard Operating Procedure for Measurement of SO₂ by Ultraviolet Fluorescence SO₂ Analyzer. <https://open.alberta.ca/publications/sop-measurement-so2-by-ultravioletfluorescence-so2-analyzer>

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

Państwowy Instytut Geologiczny Państwowy Instytut Badawczy. Nowy program NFOŚiGW dla samorządów. 300 mln zł na odwierty geotermalne. <https://www.pgi.gov.pl/geotermia/wm-aktualnosci/12331-nowy-program-nfosigw-dla-samorzadow-300-mln-zl-na-odwierty-geotermalne.html> (dostęp: 20.01.2025)

Parrish D. D., Holloway J. S., Fehsenfeld F. C. (1994) Routine, continuous measurement of carbon monoxide with parts per billion precision *Environmental Science & Technology*, 28, 1615-1618.

PEC Geotermia Podhalańska S.A. (2025) Geotermia Podhalańska. Ekologia <https://www.geotermia.pl/ekologia.html> (dostęp: 20.01.2025)

Platforma Przemysłu Przyszłości. Internet Rzeczy. Smart-Sensory. <https://przemyslprzyszlosci.gov.pl/technologie/cyfrowe/internet-rzeczy/smart-sensory-czujniki-inteligentne/> (dostęp: 20.01.2025)

Polski Fundusz Rozwoju. Baza miejskich innowacji. Dronem w dym - Górnośląskie innowacje antysmogowe. <https://pfr.pl/baza-miejskich-innowacji/dronem-w-dym-gornoslaskie-innowacje-antysmogowe> (dostęp: 20.01.2025)

Robotto, A., Bargeró, C., Marchesi, L., Racca, E., & Brizio, E. (2024) Innovative Tools to Contrast Traffic Pollution in Urban Areas: A Review of the Use of Artificial Intelligence. *Air 2* (4) 402-418

Romero C. E., Wang X. (2019) Key technologies for ultra-low emissions from coal-fired power plants. *Woodhead Publishing Series in Energy*, 39-79.

Rybak, J. (2012) Zastosowanie sieci pajęczych do oceny zawartości wybranych metali ciężkich w powietrzu na przykładzie Wrocławia. *OCHRONA ŚRODOWISKA* 34 (4) 47-50.

Sala R., Dzida J., Krasowski J. (2017) Selektywna redukcja katalityczna tlenków azotu w pojazdach spełniających normę emisji Euro VI. *Autobusy 6/2017 Eksploatacja i testy*, 1052-1056.

Slovenské elektrárne. Mapa elektrární. <https://www.seas.sk/o-nas/nase-elektrarne/mapa-elektrarni/> (dostęp: 24.01.2025)

Stepnowski, P., Synak, E., Szafranek, B. & Kaczyński, Z. (2011) Monitoring i analityka zanieczyszczeń w środowisku. *Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego*

Sówka, I., Kazimierz Gaj, K. & Miller, U. (red.). (2020). Aktualne trendy w ochronie powietrza i klimatu – kontrola, monitoring, prognozowanie i ograniczanie emisji. *Oficina Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej*.

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

TAURON Wytwarzanie Spółka Akcyjna – Oddział Elektrownia Jaworzno w Jaworznie
<https://www.tauron-wytwarzanie.pl/oddzialy/oddzial-jaworzno> (dostęp: 20.01.2025)

Uniwersytet Wrocławski. Zespół LIFE MAPPINGAIR/PL (2019) „Czy wiesz czym oddychasz?” – kampania edukacyjno-informacyjna na rzecz czystszeo powietrza. Czy można ufać budżetowym czujnikom pyłu zawieszonego? <https://mappingair.meteo.uni.wroc.pl/2019/08/czy-mozna-ufac-budzetowym-czujnikom-pylu-zawieszonego/> (dostęp: 20.01.2025)

Urząd Miasta Katowice. Ekologia. Jakość powietrza. <https://powietrze.katowice.eu/> (dostęp: 20.01.2025)

Wilk R.K. (2000) Podstawy niskoemisyjnego spalania. Wyd. Gnome, Katowice

Wong J. Y., Anderson R. L. (2012) Non-Dispersive Infrared Gas Measurement. *International Frequency Sensor Association Publishing*.

Interreg



Współfinansowany przez
UNIĘ EUROPEJSKĄ

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien
