



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

**DZIEDZINA NAUKI INŻYNIERYJNO-TECHNICZNE**

DYSCYPLINA INŻYNIERIA ŚRODOWISKA, GÓRNICTWO I ENERGETYKA

## **ROZPRAWA DOKTORSKA**

Analiza wpływu  
punktowych źródeł zanieczyszczeń pyłowych  
na mikroklimat aglomeracji krakowskie

Autor: mgr inż. Maciej Ciepiela

Promotor rozprawy: prof. dr hab. inż. Wiktoria Sobczyk  
Promotor pomocniczy: dr inż. Małgorzata Śliwka

Praca wykonana: AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami

Kraków, 2024



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

**FIELD OF SCIENCE ENGINEERING AND TECHNICAL**

SCIENTIFIC DISCIPLINE ENVIRONMENTAL ENGINEERING, MINING  
AND ENERGY

## **DOCTORAL DISSERTATION**

An analysis of the impact of point sources  
of particulate pollution on the microclimate  
of the Krakow agglomeration area

Author: MSc Eng Maciej Ciepiela

First supervisor: Prof PhD Eng Wiktoria Sobczyk  
Auxiliary supervisor: PhD Eng Małgorzata Śliwka

Completed at: AGH University of Krakow, Faculty of Civil Engineering  
and Resource Management

Kraków, 2024

Kraków, dnia 17.10.2024

Maciej Ciepiela

**Imię i nazwisko autora rozprawy**

Wiktoria Sobczyk

**Imię i nazwisko promotora rozprawy**

Wydział Inżynierii Łądowej i Gospodarki Zasobami

**Nazwa Wydziału**

Katedra Inżynierii Środowiska

**Nazwa Katedry/Instytutu**

## OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że:

**Jako autor / współautor rozprawy doktorskiej (dokumentów towarzyszących oraz streszczeń rozprawy) pt.**

Analiza wpływu punktowych źródeł zanieczyszczeń pyłowych na mikroklimat aglomeracji krakowskiej

- 1. udzielam nieodpłatnie Akademii Górniczo-Hutniczej im. St. Staszica w Krakowie w stosunku do niniejszych utworów licencji niewyłącznej na umieszczenie w bazie danych oraz upoważniam AGH do ich zwielokrotniania i udostępniania w formie elektronicznej w zakresie koniecznym dla weryfikacji autorstwa pracy i ochrony przed przywłaszczeniem jej autorstwa;**
  - 2. udzielam nieodpłatnie Akademii Górniczo-Hutniczej im. St. Staszica w Krakowie licencji niewyłącznej do korzystania z rozprawy (dokumentów towarzyszących, streszczeń) bez ograniczeń czasowych i terytorialnych na następujących polach eksploatacji \*:**
    - w zakresie obrotu oryginałem albo egzemplarzami, na których rozprawę utrwalono przez: wprowadzenie do obrotu, użyczenie lub najem egzemplarzy w postaci elektronicznej;**
    - w zakresie rozpowszechniania rozprawy przez publiczne udostępnianie rozprawy w taki sposób, aby każdy mógł mieć do niego dostęp w miejscu i w czasie przez siebie wybranym, w szczególności w sieci Internet, poprzez katalog komputerowy AGH i Repozytorium AGH;**
- \* właściwe pola zaznaczyć znakiem „X”; niezakreślenie obu pól znakiem „X” oznacza nieudzielenie licencji w zakresie określonym w pkt. 2.**
- 3. Udzielenie licencji do korzystania z rozprawy przez AGH na warunkach określonych w pkt. 2 ograniczam w następujący sposób:**  
-.

Podpis

.....  
*Maciej Ciepiela*

Maciej Ciepiela  
imię i nazwisko

Kraków, 17.10.2024  
miejsowość, data

**Oświadczenie autora rozprawy doktorskiej o jej oryginalności,  
samodzielności jej przygotowania i o nienaruszeniu praw autorskich  
oraz zgodności z wersją cyfrową**

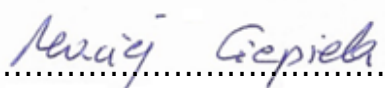
Niniejszym oświadczam, że przedłożoną rozprawę doktorską pt.: Analiza wpływu punktowych źródeł zanieczyszczeń pyłowych na mikroklimat aglomeracji krakowskiej

napisałem samodzielnie, tj.

- ✓ nie zleciłem opracowania pracy lub jej części innym osobom,
- ✓ nie przepisałem pracy lub jej części z innych opracowań i prac związanych tematycznie z moją pracą,
- ✓ korzystałem jedynie z niezbędnych konsultacji,
- ✓ wszystkie elementy pracy, które zostały wykorzystane do jej realizacji (cytaty, ryciny, tabele, programy itp.), a nie będące mojego autorstwa, zostały odpowiednio zaznaczone oraz zostało podane źródło ich pochodzenia.

Oświadczam również, że niniejsza wersja rozprawy doktorskiej jest identyczna z załączoną wersją cyfrową umieszczoną na nośniku danych.

Mam świadomość, że złożenie nieprawdziwego oświadczenia skutkować będzie niedopuszczeniem do dalszych czynności nadania stopnia doktora lub cofnięciem decyzji o nadaniu mi stopnia doktora oraz wszczęciem postępowania dyscyplinarnego.

  
.....  
czytelny podpis autora

Składam serdeczne podziękowania mojej Pani Promotor **Profesor Wiktorii Sobczyk** za nieocenione wsparcie, cenne rady i zawsze dobre słowo, które motywowały mnie do działania. Wiedza i zaangażowanie Pani Profesor były dla mnie zachętą do pracy i źródłem inspiracji.

Dziękuję **Paniom dr inż. Małgorzacie Pawul, dr inż. Małgorzacie Śliwce i dr Magdalenie Staszewskiej** za pomoc przy odbyciu praktyki pedagogicznej.

Pragnę złożyć wyrazy wdzięczności **Władzom Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska w Warszawie** za umożliwienie odbycia stażu naukowego w **Centralnym Laboratorium Badawczym w Krakowie**. Szkolenie i pomoc **Pracowników** tej jednostki pozwoliły mi poszerzyć wiedzę z zakresu metod detekcji i identyfikacji zanieczyszczeń w środowisku oraz zdobyć praktyczne doświadczenie, które było kluczowym elementem mojego rozwoju naukowego i zawodowego.

# Spis treści

Streszczenie .....	9
Abstract .....	10
Rozdział I. Wstęp .....	11
1.1. Zakres pracy, teza i cele badawcze .....	13
1.2. Przegląd literatury i analiza stanu badań .....	17
Rozdział II. Część teoretyczna.....	20
2.1. Wprowadzenie .....	20
2.2. Pyły w atmosferze.....	22
2.3. Negatywny wpływ pyłu zawieszonego na środowisko .....	27
2.4. Rozprzestrzenianie się pyłów w atmosferze .....	31
2.5. Teoretyczne podstawy modelowania dyspersji zanieczyszczeń .....	40
2.6. Regulacje prawne ochrony powietrza.....	47
2.7. Monitoring powietrza .....	52
2.8. Metody analizy ilościowej i jakościowej pyłu zawieszonego.....	55
Rozdział III. Część badawczo-obliczeniowa .....	63
3.1. Przedmiot i metodyka badań.....	63
3.2. Charakterystyka aglomeracji krakowskiej.....	78
3.3. Kryteria wyboru lokalizacji punktów pomiarowych .....	93
3.4. Dane meteorologiczne .....	95
3.5. Wyniki własnych pomiarów pyłów .....	102
3.6. Oznaczenie metali ciężkich w próbkach pyłów .....	108
3.7. Analiza statystyczna pomiarów metodą grawimetryczną.....	112

Rozdział IV. Modelowanie trajektorii wstecznych mas powietrza oraz dyspersji zanieczyszczeń.....	123
4.1. Model HYSPLIT .....	123
4.1.1. Model trajektorii wstecznych mas powietrza .....	125
4.1.2. Model dyspersji zanieczyszczeń .....	139
Rozdział V. Propozycja działań proekologicznych .....	156
Podsumowanie i wnioski.....	160
Spis tabel .....	164
Spis rysunków .....	165
Bibliografia .....	169
Załącznik 1. Warunki wprowadzania zanieczyszczeń do powietrza i charakterystyka miejsc wprowadzania gazów lub pyłów do powietrza przez zakład ArcelorMittal .....	189
Załącznik 2. Warunki wprowadzania zanieczyszczeń do powietrza i charakterystyka miejsc wprowadzania gazów lub pyłów do powietrza przez zakład Elektrociepłownia Kraków.....	190
Załącznik 3. Warunki wprowadzania zanieczyszczeń do powietrza i charakterystyka miejsc wprowadzania gazów lub pyłów do powietrza przez zakład Ekospalarnia Kraków .....	192
Załącznik 4. Dane meteorologiczne w czasie pomiarów metodą automatyczną (Balice).....	193
Załącznik 5. Dane meteorologiczne w czasie pomiarów metodą grawimetryczną (Kraków, ul. Bulwarowa) .....	195
Załącznik 6. Wyniki pomiarów pyłów PM <sub>2,5</sub> metodą automatyczną (Balice) .....	198
Załącznik 7. Wyniki pomiarów pyłów PM <sub>2,5</sub> metodą grawimetryczną (Kraków, ul. Bulwarowa).....	199

Załącznik 8. Wyniki oznaczeń niklu, arsenu, kadmu i ołowiu w pyle zawieszonym PM2,5 .....	201
---	-----

## Streszczenie

Celem pracy było zbadanie wpływu zanieczyszczeń pyłowych PM<sub>2,5</sub> ze źródeł punktowych na mikroklimat aglomeracji krakowskiej oraz analiza współzależności dyspersji pyłów i elementów mikroklimatu. Wybrano bazowe źródła emisji: Międzynarodowy Port Lotniczy Kraków-Balice, ArcelorMittal Poland, Ekospalarnia Kraków i Elektrociepłownia Kraków.

Przeprowadzono analizę ilościową stężeń pyłów PM<sub>2,5</sub> metodą automatyczną oraz analizę jakościową próbek przy zastosowaniu metody grawimetrycznej i spektrometrii emisyjnej atomowej z plazmą wzbudzaną indukcyjnie (*ICP-AES*). W próbkach stwierdzono obecność metali ciężkich: niklu, arsenu, kadmu i ołowiu, co podkreśla potrzebę monitorowania obecności tych pierwiastków ze względu na ich szkodliwość dla zdrowia człowieka i środowiska.

Analiza wyników pomiarów wykazała, że prędkość wiatru jest najważniejszym czynnikiem wpływającym na dyspersję zanieczyszczeń. Model regresji wielokrotnej pokazał wyraźną odwrotną zależność prędkości wiatru i koncentracji pyłów oraz wysoką dodatnią zależność temperatury i stężenia pyłów. Implementacja modelu *HYSPLIT* do symulacji transportu mas powietrza i zanieczyszczeń umożliwiła precyzyjne zlokalizowanie źródeł oraz odtworzenie kierunków napływu zanieczyszczeń oraz ocenę miejsc ich depozycji. Wyniki badań potwierdziły możliwość predykcji zmian mikroklimatu poprzez modelowanie trajektorii mas powietrza oraz dyspersji zanieczyszczeń pyłowych PM<sub>2,5</sub>.

Podkreślono konieczność dalszych badań i monitoringu oraz wdrożenia działań proekologicznych i edukacyjnych w celu poprawy jakości powietrza. Zaproponowano intensyfikację kampanii informacyjnych, rozwój technologii monitoringu oraz promocję indywidualnej odpowiedzialności mieszkańców aglomeracji krakowskiej za stan środowiska.

## **Abstract**

The purpose of the study was to investigate the impact of PM<sub>2.5</sub> particulate pollution from point sources on the microclimate of the Krakow agglomeration and to analyze the interdependence of particulate dispersion and microclimate elements. Baseline emission sources were selected: Kraków-Balice International Airport, ArcelorMittal Poland, The Thermal Waste Treatment Plant in Krakow, and Krakow Cogeneration Plant.

A quantitative analysis of PM<sub>2.5</sub> concentrations was carried out using an automated method, while a qualitative study of samples was conducted by the gravimetric method and inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES). Heavy metals such as nickel, arsenic, cadmium, and lead were found in the samples, highlighting the need to monitor the presence of these elements due to their harmful effects on human health and the environment.

The analysis of the measurement results showed that wind speed is the most important factor affecting the dispersion of pollutants. The multiple regression model demonstrated a clear inverse relationship between wind speed and particulate concentration and a strong positive relationship between temperature and particulate concentration. Implementing the HYSPLIT model for simulating air mass and pollutant transport made it possible to precisely locate the sources, trace the directions of pollutant inflow, and evaluate the sites of their deposition. The study results confirmed the possibility of predicting microclimate changes by modelling the trajectory of air masses and the dispersion of PM<sub>2.5</sub> pollutants.

The need for further research and monitoring, as well as the implementation of pro-environmental and educational measures to improve air quality, was emphasized. The intensification of information campaigns, development of monitoring technologies, and promotion of individual responsibility among residents of the Krakow agglomeration for the state of the environment were proposed.

## Rozdział I. Wstęp

Dzieje człowieka i natury są nierozdzielne i podlegają ciągłym przekształceniom. Zdolność człowieka do tworzenia narzędzi uczyniła go sprawcą przemian w środowisku. Pod koniec epoki lodowej człowiek podjął próby wywierania presji na procesy w ekosystemach [Weiner 2008]. Nazwa epoki geologicznej – antropocen – oznacza przejście przez człowieka władzy nad przyrodą nieożywioną i ożywioną. Człowiek ujarzmił naturę, zdominował i uprzedmiotowił ją. W tej epoce przyszło nam żyć, mierzyć się z nowymi problemami, które sami stworzyliśmy.

Od czasów rewolucji przemysłowej rabunkowa gospodarka zasobami prowadziła do zaburzenia równowagi ekologicznej. Obecnie uszczuplanie zasobów przyrody i jej metamorfoza odbywają się w niespotykanej dotąd skali. Działalność człowieka dosłownie pochłania zasoby przyrodnicze, a ekosystemy stają się industrosystemami.

Do XX wieku nie myślano o humanistycznym podejściu do ochrony środowiska. Nie szukano rozwiązań naprawczych, gdyż nie zauważano problemu. Dziś prawo chroni człowieka: jego życie, zdrowie i estetyczne warunki wypoczynku. Ale człowiek ponosi także odpowiedzialność za jakość środowiska. To nasze posłannictwo i uprawnienie sformułowane w ustawach. W latach 60. XX wieku Walery Goetel wprowadził koncepcję sozologii, w której podkreślał, że ochrona środowiska musi obejmować zarówno przyrodę ożywioną, jak i nieożywioną, oraz uwzględniać jednocześnie aspekty społeczne, techniczne i ekonomiczne [Gawor 2015]. Jego podejście wyprzedziło doktrynę zrównoważonego rozwoju, która zaczęła zyskiwać na znaczeniu po Konferencji Narodów Zjednoczonych w Sztokholmie w 1972 roku. Zwrócono wtedy uwagę na globalne problemy ekologiczne, a w 1987 roku raport „Nasza wspólna przyszłość” zdefiniował zrównoważony rozwój jako rozwój zaspokajający potrzeby obecnych pokoleń bez ograniczania możliwości rozwoju przyszłych pokoleń [Sobczyk, Ciepela 2021].

Jednym z największych wyzwań dla obszarów zurbanizowanych jest znalezienie równowagi między rozwojem gospodarczym a ochroną środowiska.

Aglomeracje miejsko-przemysłowe reprezentują kompleksy społeczno-ekonomiczne o różnorodnej strukturze społecznej, które pełnią istotną funkcję w gospodarce narodowej [Małecki 1998]. Przykładem takiego kompleksu jest aglomeracja krakowska, która zmagą się z wieloma trudnościami środowiskowymi, wśród których znaczącym problemem jest zanieczyszczenie powietrza pyłami zawieszonymi [Polski Klub 2018].

Większość pyłów zawieszonych w powietrzu stanowią pyły o średnicy większej od 2,5  $\mu\text{m}$ . Ich skład i dyspersja zależą od wielu czynników mikroklimatycznych, topograficznych i technicznych [Juda-Rezler, Toczko 2016; Karaczun i in. 2016]. W pyłach diagnozuje się pierwiastki i związki chemiczne, aerozole, substancje organiczne, bakterie i wirusy. Emisja pyłu może pochodzić ze źródeł antropogenicznych oraz ze źródeł naturalnych [Sobczyk 2014].

Problem ponadnormatywnego zanieczyszczenia pyłami zawieszonymi w Polsce, szczególnie w jej południowej części, potwierdzają raporty Światowej Agencji Środowiska [[www.eea.europa.eu](http://www.eea.europa.eu)].

Normy dopuszczalnych stężeń pyłów zawieszonych są takie same w całej Unii Europejskiej, natomiast poziomy informowania i alarmowy są rozpatrywane indywidualnie przez poszczególne kraje, gdyż wartości tych poziomów nie są określone w przepisach europejskich. Kontrowersje wzbudza fakt, że polskie normy 24-godzinne dla PM10: informowania ( $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) i alarmowy ( $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) są najwyższe w Europie i przekraczają zalecenia Światowej Organizacji Zdrowia (WHO) dla bezpiecznych stężeń dobowych [Ciepiela, Sobczyk 2021b; Rozporządzenie 2012]. Istnieje zatem potrzeba zaproponowania sposobów postępowania, które ograniczą stopień zanieczyszczenia powietrza, a także pozwolą na wprowadzenie efektywnych działań w przypadku przekroczenia poziomów tych zanieczyszczeń.

W ramach Programów Ochrony Powietrza wprowadzane są działania, których celem jest poprawa jakości powietrza. Program w Małopolsce obejmuje akcje legislacyjne, kontrolne i informacyjne [Uchwała 2020]. Regulacje dotyczą przede wszystkim spalania paliw stałych. W Programie zawarto dyrektywę dotyczącą ograniczenia emisji zanieczyszczeń z motoryzacji, dlatego też wprowadzono strefy czystego transportu. W przemyśle Program zaleca stosowanie najlepszych dostępnych technologii (BAT), ciągły monitoring emisji oraz

informowanie o awariach i zdarzeniach powodujących nadmierną emisję zanieczyszczeń [Uchwała 2023]. W przypadku stwierdzonego przekroczenia dopuszczalnych stężeń zanieczyszczeń prowadzone są wielostopniowe, krótkoterminowe plany działania określone w Prawie Ochrony Środowiska (POŚ) oraz Planie Ochrony Powietrza (POP). W ramach działań krótkoterminowych konieczne jest ogłaszanie stopni zagrożenia zanieczyszczenia powietrza, o których ostatecznie powiadamiane jest społeczeństwo. W przypadku przekroczonych stopni alarmowych postulowane jest wprowadzanie bezpłatnej komunikacji publicznej. Ponadto konieczna jest prewencyjna kontrola podmiotów eksploatujących instalacje objęte pozwoleniami zintegrowanymi [Instytut Podstaw...2021].

Na obszarze aglomeracji krakowskiej notuje się wysokie stężenia pyłów zawieszonych PM<sub>2,5</sub> i PM<sub>10</sub> [Kleczkowski 2020]. Jak wynika z raportu Głównego Urzędu Statystycznego pt. „Rozwój regionalny Polski 2022”, zakłady szczególnie uciążliwe dla czystości powietrza w 2021 roku wyemitowały 22,2 tys. ton pyłów. W tym okresie w województwie małopolskim emisja zanieczyszczeń pyłowych wyniosła ponad 1000 ton [GUS 2022]. Problem potęguje położenie Krakowa w niecce oraz zabudowa korytarzy powietrznych. Następstwem jest ograniczona dyfuzja zanieczyszczeń w powietrzu atmosferycznym, a co za tym idzie, słabe przewietrzanie [Kleczkowski 2020; Zimny 2005].

W celu zmniejszenia stężenia zanieczyszczeń pyłowych i spełnienia norm stężeń pyłów zawieszonych PM<sub>2,5</sub> i PM<sub>10</sub> w 2019 roku wprowadzono w Krakowie całkowity zakaz spalania paliw stałych w instalacjach dla systemów ogrzewania (paleniska domowe) lub wydzielających energię cieplną.

## **1.1. Zakres pracy, teza i cele badawcze**

Zakres niniejszej rozprawy obejmuje analizę wybranych punktowych źródeł zanieczyszczeń pyłowych oraz zbadanie zależności między emisją pyłów i elementami mikroklimatu aglomeracji krakowskiej. Mikroklimat kształtują specyficzne czynniki, znamienne dla małego obszaru: wahania temperatury i ekspozycja na słońce, wilgotność powietrza, ruch powietrza, ciśnienie atmosferyczne, zachmurzenie, szata roślinna, wysokość n.p.m., zróżnicowanie

urzeźbienia powierzchni terenu (mikrorelief), topografia. Zmiany fizycznych czynników mikroklimatycznych tworzą zjawiska typowe dla ograniczonego obszaru, zachodzące w kilkumetrowej warstwie powietrza: pionowa stateczność powietrza, inwersja temperatury, konwekcja, smog, miejska wyspa ciepła, mgły i zamglenia.

Rozprawa składa się z pięciu rozdziałów. Po zaprezentowaniu tezy, celów pracy i przeglądu literatury, w części II scharakteryzowano właściwości i klasyfikację pyłów, typy ich dyspersji, matematyczne modele do symulacji dyspersji zanieczyszczeń w zmiennych warunkach atmosferycznych oraz w różnorodnym terenie. W części III, badawczej, przedstawiono metodykę i przebieg badań, wyniki analiz ilościowych i jakościowych oraz interpretację uzyskanych danych. Przeprowadzono szczegółową ocenę stężeń pyłów PM<sub>2,5</sub>, uwzględniając wpływ wybranych źródeł punktowych aglomeracji krakowskiej na lokalne parametry mikroklimatyczne. W rozdziale IV pt. „Modelowanie trajektorii wstecznych mas powietrza oraz dyspersji zanieczyszczeń” zaprezentowano model *HYSPLIT* do symulacji transportu mas powietrza i zanieczyszczeń, co pozwoliło na identyfikację głównych szlaków przemieszczania się pyłów. Potwierdzono istotną wzajemną zależność parametrów mikroklimatycznych i dyspersji zanieczyszczeń pyłowych. W części V zaproponowano lokalne działania proekologiczne oraz akcje edukacyjno-informacyjne dla społeczeństwa.

Powierzchnia badanego obszaru wynosi około 30 tysięcy km<sup>2</sup>, a obszar zamieszkuje prawie 1,5 mln osób. Po wstępnej ocenie punktowych źródeł zanieczyszczeń pyłowych wytypowano 4 obiekty: Elektrociepłownia w Krakowie; Zakład Termicznego Przekształcania Odpadów w Krakowie (Ekospalarnia Kraków); ArcelorMittal w Krakowie oraz Międzynarodowy Port Lotniczy Kraków-Balice.

Pomiar w bliskim otoczeniu wszystkich wspomnianych źródeł jest trudny i czasochłonny, dlatego pobór pyłów zawieszonych PM<sub>2,5</sub> został przeprowadzony z wykorzystaniem infrastruktury Centralnego Laboratorium Badawczego Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska, przy ulicy Półnanki 76E w Krakowie. W tym celu zawarto porozumienie o prowadzenie stażu dla doktoranta, pomiędzy ww. Laboratorium a Wydziałem Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie. Staż odbywał się w okresie od 1 sierpnia 2022 roku do 28 kwietnia 2023 roku, w następujących pracowniach: Pracownia Badań Automatycznych Powietrza; Pracownia Terenowa

w Krakowie; Pracownia Fizykochemiczna w Krakowie, a także Regionalny Wydział Monitoringu Środowiska przy ulicy Dunajewskiego 6/31 w Krakowie. Staż w akredytowanym laboratorium stanowił integralną część realizacji Indywidualnego Planu Badawczego, a także pozwolił zdobyć nowe umiejętności, poznać obsługę i funkcjonowanie aparatury badawczej.

Wyżej wymienione aspekty pozwoliły na zdefiniowanie **problemu badawczego**, polegającego na rozpoznaniu zależności między stopniem zanieczyszczenia pyłowego a czynnikami mikroklimatycznymi występującymi w aglomeracji krakowskiej. Rozwiązaniu problemu służy modelowanie trajektorii mas powietrza, umożliwiające przeprowadzenie symulacji zjawiska dyspersji i depozycji zanieczyszczeń, a tym samym antycypację warunków mikroklimatycznych nad badanym obszarem.

Autor rozprawy sformułował następującą tezę:

***Istnieje możliwość predykcji zmian mikroklimatu aglomeracji krakowskiej przy wykorzystaniu modelowania trajektorii mas powietrza, dyspersji i depozycji zanieczyszczeń pyłowych PM<sub>2,5</sub> pochodzących z punktowych źródeł przemysłowych.***

Weryfikacja postawionej tezy wymagała realizacji następujących celów i zadań badawczych:

**Cel 1. Wybór punktowych źródeł zanieczyszczeń pyłowych PM<sub>2,5</sub> w aglomeracji krakowskiej**

- Zadanie badawcze 1: Identyfikacja i obserwacja punktów pomiarowych zanieczyszczeń pyłowych PM<sub>2,5</sub> w aglomeracji krakowskiej;
- Zadanie badawcze 2: Wyznaczenie kryteriów wyboru reprezentatywnych punktów pomiarowych;
- Zadanie badawcze 3: Wybór punktów pomiarowych.

## **Cel 2. Analiza ilościowa pyłów zawieszonych**

- Zadanie badawcze 1: Pomiar zanieczyszczeń powietrza pyłem zawieszonym PM<sub>2,5</sub> przy użyciu metody pomiarowej automatycznej na wyznaczonych punktach pomiarowych.

## **Cel 3. Analiza jakościowa próbek pyłów**

- Zadanie badawcze 1: Pobór próbek frakcji pyłów zawieszonych PM<sub>2,5</sub> z zastosowaniem metody pomiarowej grawimetrycznej (niskoprzepływowy pobornik pyłu);
- Zadanie badawcze 2: Przeprowadzenie procedury wagowej poprzez kondycjonowanie oraz sprawdzenie różnicy w masie filtra kwarcowego przed ekspozycją i po ekspozycji na zanieczyszczenia;
- Zadanie badawcze 3: Pomiar stężeń metali ciężkich (Pb, Cd, As, Ni) w próbkach pyłów przy zastosowaniu metody spektrometrii emisyjnej atomowej ze wzbudzeniem plazmowym (*ICP-AES*).

## **Cel 4. Rozpoznanie warunków mikroklimatycznych w aglomeracji krakowskiej**

- Zadanie badawcze 1: Wybór parametrów kształtujących mikroklimat;
- Zadanie badawcze 2: Przyporządkowanie pomiarów metodą grawimetryczną parametrom mikroklimatycznym;

## **Cel 5: Wykrywanie współzależności czynników mikroklimatycznych i stopnia zapylenia. Obliczenie modelu regresji wielokrotnej**

- Zadanie badawcze 1. Obliczenie statystyk opisowych parametrów mikroklimatycznych i stężenia pyłu PM<sub>2,5</sub> (miary tendencji centralnej, miary rozproszenia, miary asymetrii, miary niezależności cech);
- Zadanie badawcze 2. Obliczenie modelu regresji dla jednej zmiennej zależnej i wielu zmiennych niezależnych;
- Zadanie badawcze 3. Weryfikacja statystycznej istotności modelu za pomocą analizy wariancji ANOVA oraz testu F;

## **Cel 6. Przeprowadzenie symulacji transportu mas powietrza i zanieczyszczeń w aglomeracji krakowskiej**

- Zadanie badawcze 1. Poznanie teoretycznych podstaw modelowania dyspersji zanieczyszczeń oraz wybór modelu;
- Zadanie badawcze 2. Obliczenie adwekcji i dyfuzji zanieczyszczeń podczas epizodów podwyższonych stężeń;
- Zadanie badawcze 3. Weryfikacja wyników poprzez analizę map synoptycznych Europy;
- Zadanie badawcze 4. Implementacja modelu dyspersji zanieczyszczeń typu „Forward”.

## **Cel 7. Poprawa stanu zdrowotnego mieszkańców**

- Zadanie badawcze 1. Opracowanie działań prewencyjnych oraz zaradczych dla mieszkańców aglomeracji krakowskiej.

## **1.2. Przegląd literatury i analiza stanu badań**

W literaturze dotyczącej problematyki zanieczyszczenia powietrza pyłami zawieszonymi PM<sub>2,5</sub> w aglomeracji krakowskiej pojawia się wiele kluczowych kwestii badawczych. Główne zagadnienia obejmują źródła emisji zanieczyszczeń, zmienność sezonową, wpływ czynników mikroklimatycznych oraz wpływ pandemii COVID-19 na zmiany stężenia pyłów.

Wykazano, że w latach 2020-2021, w porównaniu do lat 2018-2019, stężenie PM<sub>2,5</sub> spadło o 25%, co potwierdza efektywność regulacji oraz wpływ pandemii COVID-19 [Ryś, Samek 2022; Rogulski, Badyda 2021].

Pomiary w miesiącach zimowych wykazały stężenia pyłu PM<sub>2,5</sub> 2,6 razy wyższe niż latem, co wynika głównie z emisji ze spalania paliw kopalnych w okresie grzewczym [Samek, Skiba 2020]. Podobne wnioski, dotyczące sezonowości stężeń PM<sub>2,5</sub>, potwierdzają inne badania o wyższym stężeniu pyłów w okresie zimowym [Samek, Stęgowski 2020; Ziernicka-Wojtaszek, Zuśka 2024].

Pyły PM<sub>2,5</sub> przenikają do wnętrza budynków, co zwiększa ich negatywny wpływ na zdrowie mieszkańców, szczególnie w sezonie zimowym. Niestety, w pomieszczeniach zamkniętych pyły PM<sub>2,5</sub> są sporadycznie kontrolowane [Bekierski, Kostyrko 2021].

Badania składu chemicznego wykazały, że podczas epizodów wysokiego zanieczyszczenia PM<sub>2,5</sub> dominują aerozole węglowe, co potwierdza dużą rolę spalania biomasy i paliw kopalnych. To zjawisko jest obserwowane w wielu miastach Polski, w tym również Krakowie [Błaszczak, Zioła 2020].

Analiza z 2008 roku (projektowano wtedy Zakład Termicznego Przekształcania Odpadów Komunalnych) wykazała niski wpływ obiektu na stopień stężenia pyłów PM<sub>2,5</sub> [Rzeszutek, Oleniacz 2015]. W przypadku innego źródła punktowego: Zakładu ArcelorMittal w Krakowie stwierdzono znaczącą emisję pyłów PM<sub>2,5</sub>, co wymagało dalszej kontroli i analizy pod kątem wpływu kompleksu na stężenia pyłów w aglomeracji [Mazur, Oleniacz 2008].

Literatura dotycząca emisji pyłów ze spalania węgla kamiennego w ciepłowniach o mocy poniżej 50 MW podkreśla trudności w spełnieniu norm środowiskowych w latach 2013–2016. Badania pokazują, że spalanie węgla o przeciętnych parametrach (wartości opałowej węgla: 20000–23000 kJ/kg, zawartości popiołu w węglu kamiennym: 15–20%) nie spełniało wymogów emisji pyłów bez zastosowania urządzeń odpylających o wysokiej skuteczności. Wprowadzenie restrykcyjnych norm w 2016 roku wymusiło modernizację w starszych ciepłowniach [Stala-Szlugaj 2013].

Prace naukowo-badawcze obejmują również badania ultradrobnych cząstek, co jest istotnym uzupełnieniem badań nad pyłami PM<sub>2,5</sub>. Badania w Porcie Lotniczym we Frankfurcie wskazują na podobne zjawiska związane z emisją z ruchu lotniczego w Porcie Lotniczym Kraków-Balice [Dröge, Klingelhöfer 2024].

Analizy chemiczne i statystyczne wykazały przemysłowe, energetyczne i komunikacyjne źródła emisji pyłów PM<sub>2,5</sub> w Krakowie [Czerwińska, Wielgościński 2020; Kunecki, Franus 2020].

W badaniach wpływu czynników mikroklimatycznych PM<sub>2,5</sub> w Krakowie wykazano, że temperatura, prędkość wiatru oraz wilgotność względna miały bezpośredni wpływ na rozprzestrzenianie się pyłów. Podkreślono wpływ stabilnych

warunków atmosferycznych w okresie zimowym, sprzyjających kumulacji zanieczyszczeń [Zglobicki, Baran-Zglobicka 2024]. Prowadzone badania nad składem chemicznym opadów atmosferycznych potwierdziły napływ zanieczyszczeń pyłowych do różnych komponentów środowiska [Kotowski, Motyka 2020].

Złożoność problemu monitorowania stężeń pyłów w miastach, takich jak Kraków potwierdza implementacja nowoczesnych technik analizy zdjęć nieba do szacowania stężeń pyłów PM<sub>2,5</sub> [Chuchro, Sarlej 2021].

Przegląd literatury uwierzytelnia negatywny wpływ pyłów PM<sub>2,5</sub> na zdrowie człowieka, szczególnie w nasileniu objawów chorób układu oddechowego i krążenia. Nawet krótkotrwała ekspozycja na wysokie stężenia PM<sub>2,5</sub> może prowadzić do zaostrzenia infekcji, a długotrwałe narażenie zwiększa ryzyko przedwczesnej śmierci [Krzyszowiak, Pawlas 2018]. Tematyka zanieczyszczenia pyłami zawieszonymi w aglomeracji krakowskiej budzi zainteresowanie wielu naukowców. Kluczowe kwestie to wpływ różnych źródeł emisji, sezonowa zmienność stężeń pyłów i ich związek z warunkami mikroklimatycznymi, a także efekt pandemii COVID-19 na jakość powietrza. Udokumentowano nasilenie stopnia w okresie zimowym, jednakże konieczne są dalsze badania nad źródłami emisji pyłów poza sezonem grzewczym. Badania jednoznacznie potwierdzają, że wprowadzenie regulacji, takich jak zakaz spalania paliw stałych, miało istotny wpływ na obniżenie stężeń PM<sub>2,5</sub>. By lepiej zrozumieć całoroczny wpływ emitorów na jakość powietrza, należy prowadzić pomiary stężeń pyłów PM<sub>2,5</sub> wewnątrz zamkniętych pomieszczeń.

Z uwagi na złożoną strukturę topograficzną i przemysłową aglomeracji krakowskiej należy prowadzić dalsze cykliczne obserwacje, analizy i monitorowanie punktowych źródeł emisji pyłów, dla oceny ich lokalnego wpływu na jakość powietrza. Przykładem są obiekty opisane w rozprawie: ArcelorMittal, Zakład Termicznego Przekształcania Odpadów Komunalnych (Ekospalarnia Kraków), a także Elektrociepłownia Kraków. Ważnym obszarem badań w kontekście zdrowia mieszkańców jest również emisja ultradrobnych cząstek z lotniska Kraków-Balice. Zwiększenie świadomości społecznej na temat zanieczyszczeń powietrza oraz dalsze rozwijanie technologii monitoringu są kluczowe dla skutecznej walki z tym problemem.

## **Rozdział II. Część teoretyczna**

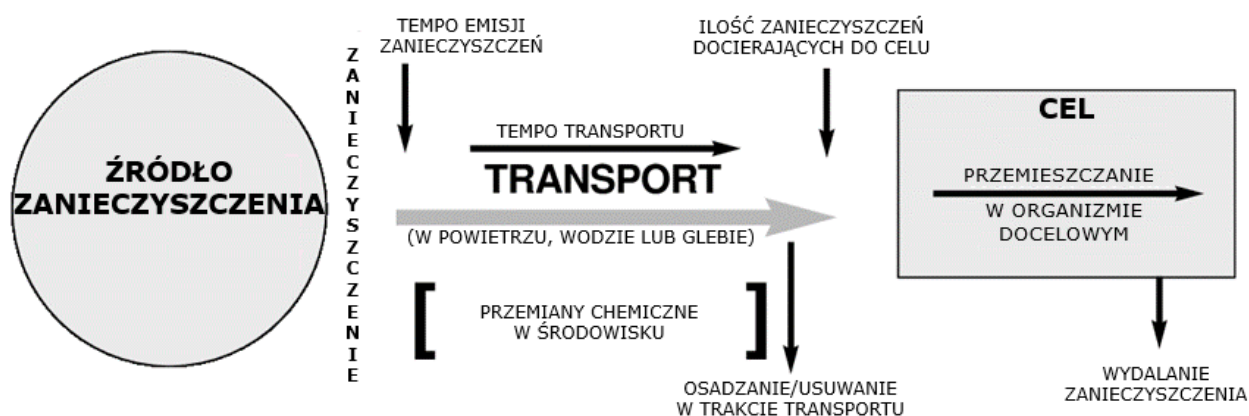
W rozdziale II omówiono problematykę zanieczyszczenia powietrza. Rozdział rozpoczyna się od charakterystyki pyłów, z podziałem na frakcje, analizy źródeł emisji (naturalne i antropogeniczne), a także negatywnego wpływu pyłów na środowisko. Następnie opisano procesy rozprzestrzeniania się pyłów w atmosferze, z uwzględnieniem kluczowych czynników mikroklimatycznych, topograficznych i technicznych. Przedstawiono również metody modelowania dyspersji zanieczyszczeń, które stanowią istotny element w prognozowaniu i zarządzaniu jakością powietrza. W rozdziale zawarto także przegląd regulacji prawnych dotyczących ochrony powietrza zarówno w Polsce, jak i w Unii Europejskiej, ze szczególnym uwzględnieniem norm i poziomów dopuszczalnych stężeń pyłów. W części końcowej rozdziału opisano metody analizy ilościowej i jakościowej pyłu zawieszonego, w tym metody grawimetrycznej, automatycznej oraz analitycznej, z wyszczególnieniem techniki spektrometrii emisyjnej atomowej z plazmą wzbudzaną indukcyjnie.

### **2.1. Wprowadzenie**

Atmosferę ziemską stanowi warstwa gazów otaczających naszą planetę. Jej obecność i skład<sup>1</sup> mają ogromny wpływ na życie na Ziemi. Atmosfera pełni ważną rolę nie tylko w ochronie organizmów żywych przed szkodliwym promieniowaniem kosmicznym, ale także w utrzymaniu stabilnej temperatury na powierzchni Ziemi. Składa się z azotu (78%), tlenu (21%), argonu oraz niewielkich ilości innych gazów szlachetnych (0,94%), a także dwutlenku węgla i pary wodnej [Krystek 2018; Sobczyk 2014].

Powietrze atmosferyczne, które w stanie naturalnym jest bezbarwne i bezwonne, jest istotnym zasobem, który odnawia się za sprawą cyklu biologicznego w biosferze. Zdolność samooczyszczania atmosfery to proces, w którym atmosfera usuwa zanieczyszczenia poprzez fizyczne i chemiczne mechanizmy. Przykładem jest silna prędkość wiatru, który dyfunduje i rozcieńcza zanieczyszczenia, a przepływ zimnego powietrza wspomaga ten proces. Opady

atmosferyczne w sposób naturalny usuwają zanieczyszczenia z powietrza, przenosząc je na ziemię. W wyniku tych zjawisk stężenie i toksyczność zanieczyszczeń stopniowo maleją, a środowisko powraca do swojego czystego stanu. Niemniej jednak działania ludzkie, takie jak wycinanie lasów oraz emisja zanieczyszczeń, energii i mikroorganizmów, mogą zakłócić ten cykl i doprowadzić do zanieczyszczenia atmosfery. W powietrzu dochodzi również do rozproszenia zanieczyszczeń do różnych komponentów środowiska [Karaczun i in. 2016; Sobczyk 2014; Zhou i in. 2023]. Proces ten opisał Sir Frederick Warner Holdgate w 1979 r. Na rysunku 1 przedstawiono model transportu zanieczyszczeń, w którym źródło zanieczyszczenia zostaje przeniesione w powietrzu, wodzie oraz glebie na obiekty docelowe [Janka 2014].



**Rys. 1.** Zanieczyszczenie środowiska według modelu Holdgate'a  
Źródło: [Boon i in. 2001]

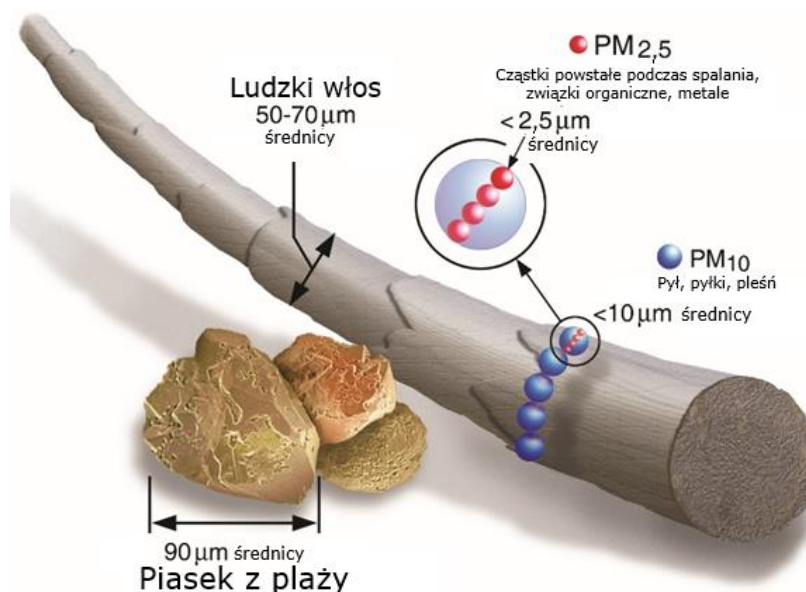
Wśród źródeł zanieczyszczeń wpływających na środowisko wyróżnia się cztery grupy zanieczyszczeń: gazy i pary związków chemicznych, cząstki stałe (zarówno organiczne, jak i nieorganiczne), kropelki cieczy oraz mikroorganizmy. Ich nienaturalne występowanie lub nadmiar w powietrzu wskazuje na jego zanieczyszczenie [Bogacki, Syguła 2014].

## 2.2. Pyły w atmosferze

Zagadnienie pyłów zawieszonych wymaga wyjaśnienia, czym są i jak powstają. Powietrze atmosferyczne zanieczyszczone jest licznymi substancjami. Do najczęściej i najliczniej występujących zanieczyszczeń należą cząstki stałe, czyli frakcje pyłów PM10 i PM2,5 [Mazurek, Badyda (red.) 2018].

Pył zawieszony to rozproszona faza w układzie dwufazowym, gdzie ciało stałe rozprasza się w gazie. Gdy wymiary cząstek fazy rozproszonej nie przekraczają 0,1 nm, nazywa się je aerozolami, natomiast gdy są większe, to suspensoidami [Anigacz, Zarkowicz 2003; Juda-Rezler, Toczko (red.) 2016]. Na rysunku 2 przedstawiono porównanie wielkości pyłów zawieszonych PM2,5 i PM10 na tle ziarenka piasku oraz ludzkiego włosa. Literatura najczęściej klasyfikuje całkowity pył zawieszony według średnicy cząstek [Barchańska i in. 2021; Juda-Rezler, Toczko (red.) 2016; Janka 2014;]:

- Pył PM10 – pył inhalabilny o średnicy nie większej niż 10  $\mu\text{m}$ ;
- Pył PM2,5 – pył respirabilny o średnicy mniejszej niż 2,5  $\mu\text{m}$ ;
- Pył PM1 – pył submikronowy o średnicy mniejszej niż 1  $\mu\text{m}$ ;
- Pył PM0,1 – pył ultradrobny o średnicy mniejszej niż 0,1  $\mu\text{m}$ .



**Rys. 2.** Porównanie wielkości cząstek pyłów zawieszonych  
Źródło: [www.epa.europa.eu]

Warto zaznaczyć, że cząstki PM<sub>2,5</sub> różnią się nie tylko rozmiarem, ale także procesami, które prowadzą do ich powstania w atmosferze, tworząc różne zbiory cząstek [Juda-Rezler, Toczko (red.) 2016; Markowicz 2013]:

- Cząstki w stanie nukleacji – najmniejsze cząstki, których średnice zastępcze wynoszą poniżej 10 nm (0,01 μm). Ich geneza wiąże się z zjawiskami nukleacji zachodzącymi w atmosferze;
- Cząstki Aitkena – grupa cząstek o rozmiarach zastępczych mieszczących się w przedziale od 10 nm do 100 nm (0,01 μm – 0,1 μm). Cząstki te formują się poprzez procesy nukleacji, które mogą być albo homogeniczne, albo heterogeniczne, z przesyconej pary gazów chemicznych;
- Cząstki w stanie akumulacji – frakcja o średnicach zastępczych pomiędzy 0,1 μm (PM<sub>0,1</sub>) a 1 μm (PM<sub>1</sub>). Zazwyczaj ich powstawanie jest rezultatem procesów aglomeracji i kondensacji cząstek Aitkena. W trakcie tych procesów mogą tworzyć się na przykład krople kwasu siarkowego w atmosferze. Ich wymiary są podobne do długości fal widzialnych i pełnią istotną rolę w procesach radiacyjnych atmosfery.

Większość z pyłów w środowisku ma średnicę większą niż 2,5 μm. Ich skład może być różnorodny w zależności od tworzących je czynników. Pył na terenach miejskich charakteryzuje się innymi właściwościami niż pył na terenach podmiejskich oraz wiejskich. Pył miejski zawiera dużą gamę składników, w tym metale ciężkie i węglowodory. Na terenach podmiejskich i wiejskich, gdzie rozwija się przemysł, skład pyłu może być podobny do miejskiego, natomiast w obszarach rolniczych i naturalnych przeważają substancje organiczne, np. powstałe w wyniku erozji gleb. Wśród zanieczyszczeń atmosferycznych, które występują w znacznych ilościach w cząstkach pyłów, znajdują się:

- Metale ciężkie – pierwiastki przekraczające gęstość 4,5 g/cm<sup>3</sup>. Zalicza się do nich ołów (Pb), kadm (Cd), cynk (Zn), miedź (Cu), arsen (As), nikiel (Ni). Można również wyróżnić kationy zasadowe metali alkalicznych, takich jak wapń (Ca), magnez (Mg), sód (Na) i potas (K). Stopień toksyczności tych pierwiastków jest bezpośrednio związany z ich chemicznym charakterem i formami występowania. Metale ciężkie wraz z pyłami mogą migrować w przyrodzie, powodując przy tym zakłócenia równowagi dynamicznej środowiska wodnego oraz glebowego;

- Wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA) – trwałe zanieczyszczenia pochodzenia organicznego, tworzące złożone mieszaniny, których ilość i jakość zależą od rodzaju materiału spalanego oraz warunków, w jakich zachodzi proces spalania. Głównym źródłem tych substancji jest niepełne spalanie paliw. WWA obejmują związki kancerogenne: benzo(a)piren, dibenzo(a,h)antracen, benzo(a)antracen, benzo(b)fluoranten i dibenzo(a,e)piren. Substancje te mogą być obecne w formie stałej w atmosferze, akumulując się na powierzchni cząstek pyłów, mgieł lub dymu. Ponadto podczas reakcji z tlenkami azotu powstają nitrowe pochodne WWA, które odznaczają się jeszcze większą mutagennością i kancerogennością;
- Polichlorowane bifenylole (PCB) – syntetyczne ciecze będące mieszaninami kongenerów i izomerów o różnej liczbie atomów chloru. Związki te przedostają się do środowiska wskutek parowania oraz usuwania ścieków przemysłowych, a także podczas składowania odpadów. Szacuje się, że wspomniane źródła stanowią 80% tych związków w środowisku naturalnym [Bell, Treshow 2004; Kuskowska, Dmochowski 2016; Starek 2001].

Dotychczasowe analizy wykonywane przez instytuty badawcze i laboratoria koncentrowały się na obserwacji zawartości śladowych pierwiastków we frakcjach pyłu zawieszonego oraz monitorowaniu stężeń masowych [Barchańska i in. 2021; Niesler, Stecko 2021; Stelmach, Matuszek 2018]. Większość tych substancji jest emitowana podczas procesów przemysłowych związanych z przetwarzaniem lub wykorzystaniem węgla do produkcji energii. Badania pokazały, że istnieje możliwość zastąpienia paliwa kokowego biocharami, czyli porowatymi materiałami węglowymi powstałymi w wyniku pirolizy, co jednocześnie mniejsza emisję tlenków siarki. Wiąże się to niestety z większą emisją pyłu, ale zastosowanie odpowiednich systemów odpylania może zniwelować ten problem. Podobnie "błękitny węgiel" - zmodyfikowane paliwo stałe produkowane z węgla kamiennego, poddawany jest procesowi częściowego zgazowania, w wyniku czego usuwane są szkodliwe substancje lotne. Produkt stanowi ekologiczną alternatywę dla tradycyjnego węgla kamiennego, redukując emisję pyłów i toksycznych związków organicznych o ponad 90%, co znacząco poprawia jakość powietrza. Równocześnie globalne prognozy wskazują, że produkcja i zużycie węgla na świecie osiągnęły szczyt w 2023 roku, po czym zaczęły stopniowo spadać z powodu dekarbonizacji gospodarek. Do 2026 roku przewiduje się spadek globalnej

produkcji o 4% i popytu o 2%. W dalszych prognozach do 2050 roku przewiduje się znaczne zmniejszenia wydobycia węgla o nawet 75%. Podobne tendencje obserwuje się w Polsce, mimo że węgiel pozostaje wciąż istotnym źródłem energii. Do 2030 roku planowane jest zmniejszenie produkcji węgla o 32% i jego zużycia o 23% [Stala-Szlugaj 2024]. Badania również potwierdzają zróżnicowanie ilościowych stężeń cząstek pyłu zawieszonego w zależności od lokalizacji geograficznej oraz typu obszaru. W obszarach miejskich średnie stężenie cząstek pyłu zawieszonego waha się w przedziale 10000-25000 cząstek/cm<sup>3</sup> [Juda-Rezler, Toczko (red.) 2016].

W kontekście analizy zanieczyszczeń atmosferycznych istnieją różne kategorie, które pomagają lepiej zrozumieć ich naturę i wpływ na jakość powietrza. Sposób powstawania klasyfikuje pyły na pierwotne i wtórne. Te pierwsze występują w powietrzu w formie, w jakiej zostały wyemitowane ze źródła, podczas gdy zanieczyszczenia wtórne powstają w wyniku reakcji chemicznych lub fotochemicznych między składnikami atmosfery a zanieczyszczeniami. Innym kryterium podziału jest źródło pochodzenia pyłów zawieszonych, które może być naturalne lub antropogeniczne [Hys i in. 2018; Sobczyk (red.) 2010].

Od miliardów lat środowisko na Ziemi ulega zmianom. Przetrwanie gatunkom umożliwiły adaptacje genetyczne, a klimat odgrywał kluczową rolę w tych procesach. Ponadto w historii Ziemi notuje się zmiany rewolucyjne, które mogą stanowić istotne zagrożenie dla życia na planecie [Prandecki, Sadowski 2010]. Do źródeł naturalnych, niezależnych od działalności człowieka, zalicza się wybuchy wulkanów, erozję gleb i skał, opad pyłu kosmicznego, pożary lasów, a także procesy biologiczne roślin polegające na wytwarzaniu pyłków [Sobczyk 2014; Weiner 2008].

Relacje człowieka ze środowiskiem obejmują skomplikowane interakcje. Ludzkość nie może istnieć poza ekosystemem, a oddziaływanie nań zależy od poziomu rozwoju gospodarczego i świadomości ekologicznej społeczeństwa. Im wyższy poziom rozwoju, tym większa szansa na racjonalne wykorzystanie zasobów. Ale tylko szansa, gdyż nadal istnieją wyzwania związane z utrzymaniem równowagi pomiędzy potrzebami człowieka a ochroną środowiska [Zioło, Zioło 2010].

Podstawowe źródła antropogenicznych zanieczyszczeń powietrza obejmują przemysł, transport, spalanie paliw w kotłowniach i paleniskach domowych, a także działalność rolniczą [Mazurek, Badyda 2018; Sobczyk 2014]. Największą presję na środowisko wywierają następujące sektory gospodarki: wydobywanie surowców, energetyka, produkcja cementu oraz sektor chemiczny [Ciepiela, Sobczyk 2018a; Lewandowski, Aranowski 2016].

Pod względem sposobu rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń źródła antropogeniczne można podzielić na trzy główne kategorie – punktowe, liniowe oraz powierzchniowe [Stepnowski i in. 2010]. Źródła punktowe, które są tematem niniejszej rozprawy, to te, z których zanieczyszczenia wprowadzane są do atmosfery w zorganizowany sposób, najczęściej za pomocą pojedynczych kominów lub zestawów kominów. Opiswane są one określoną wysokością i średnicą, a także sposobem emisji zanieczyszczeń. Przeważnie są to instalacje przemysłowe odznaczające się różnorodnością emitowanych substancji, dużą wysokością emisji, dużymi ilościami emitowanych gazów oraz wysokimi parametrami tych gazów [Ciepiela, Sobczyk 2018a; Krystek (red.) 2018; Pałasz 2016].

Do emitatorów liniowych należą transport drogowy, lotniczy, kolejowy oraz wodny. Liniowe źródła zanieczyszczeń są emitatorami usytuowanymi wzdłuż określonej linii, takich jak trasy komunikacyjne o dużym natężeniu ruchu pojazdów, a także kominy znajdujące się blisko siebie i ułożone w linii. Zanieczyszczenia pochodzące z źródeł liniowych często wynikają z działania silników spalinowych [Mleczek, Borowiak i in. 2021]. W przypadku silników wysokoprężnych cząstki stałe występują częściej niż w przypadku silników o zapłonie iskrowym. Istotnym pod względem emisji zanieczyszczeń typem komunikacji jest transport lotniczy. Zanieczyszczenia pochodzą głównie z procesu spalania paliwa w silnikach samolotów. Podczas manewrów samolotów na lotniskach emitowane są także cząstki stałe w wyniku ścierania nawierzchni pasów startowych oraz opon. Jednak w porównaniu z emisją spalin generowanych przez ruch drogowy, samoloty generują duże ilości pyłów ultradrobnych, a także tlenki azotu, dwutlenek węgla i tlenek węgla [Merzenich 2021; Mysłowski 2011].

Zanieczyszczenia powierzchniowe pochodzą z konkretnych obszarów, takich jak pojedyncze punkty emisji w sektorze komunalnym, zwykle usytuowane blisko siebie. Charakteryzują się one specyficznym i niekontrolowanym rodzajem substancji emitowanych, niską wysokością źródeł emisji, ograniczonym

wydobywaniem gazów oraz ich niską temperaturą, a także niewielkimi prędkościami wypływu. Do powierzchniowych emitorów zanieczyszczeń zaliczają się paleniska domowe, składowiska odpadów, kopalnie odkrywkowe, tereny rolnicze oraz parkingi i inne obszary utwardzone [Karaczun, Obidoska i in. 2016; Lisiak-Zielińska, Borowiak i in. 2021; Pałasz 2016].

### **2.3. Negatywny wpływ pyłu zawieszonego na środowisko**

Działalność człowieka oraz związana z nią emisja pyłów prowadzi do wielu negatywnych zmian w środowisku przyrodniczym. Obciążenie środowiska ma charakter skutków bezpośrednich i pośrednich. Skutki bezpośrednie można podzielić na pierwotne (zmiana jakości powietrza atmosferycznego) i wtórne, np. zmniejszenie nasłonecznienia spowodowane dużą koncentracją pyłów w powietrzu. W przypadku skutków pośrednich można wyróżnić: pogorszenie stanu zdrowia i komfortu życia ludności, pogorszenie estetyki krajobrazu, degradację gleb, straty w rolnictwie (zmniejszenie efektywności upraw), straty materialne związane z renowacją materiałów budowlanych [Dobrzańska, Dobrzański i in. 2012; Lewandowski, Klugmann-Radziemska 2017; Mannion 2001].

Zanieczyszczenie powietrza rozpatruje się w ujęciu regionalnym lub globalnym. W przypadku miejsc regionalnych ze źródeł antropogenicznych następuje emisja pyłów, które negatywnie wpływają na zdrowie i życie okolicznych mieszkańców. Wpływ zależy od wielkości frakcji oraz ich składu chemicznego [Karaczun, Obidoska i in. 2016]. Zjawisko globalnego zanieczyszczenia natomiast występuje, gdy jego wpływ jest odczuwalny na całej planecie. Przykładem może być erupcja wulkanu, w wyniku której znaczne ilości zanieczyszczeń pyłowych przedostają się do atmosfery, następuje absorpcja promieniowania słonecznego i obniżenie temperatury na powierzchni Ziemi [Awdankiewicz 2011; Ciepela Sobczyk 2021d; Cowie 2009].

Literatura wyróżnia cztery grupy pyłów ze względu na szkodliwość, będącą następstwem ich składu chemicznego i budowy strukturalnej [Janka 2014; Juda, Chróściel 1974]:

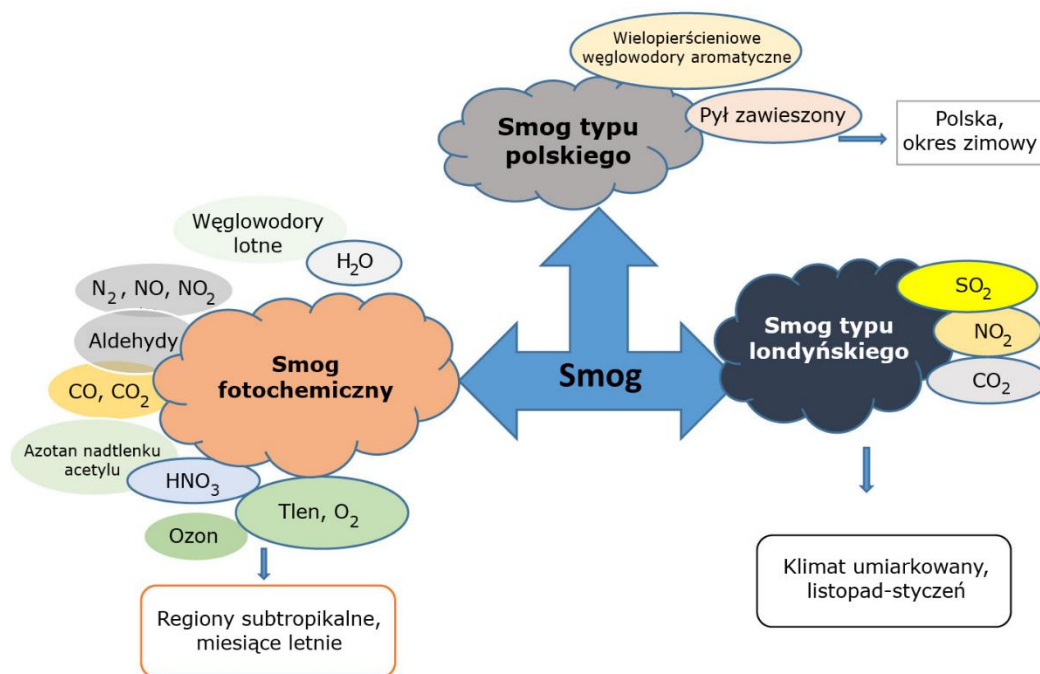
- Pyły toksyczne, które po przedostaniu się do organizmu powodują jego zatrucie oraz choroby nowotworowe. Ich toksyczność wzrasta wraz z większą

reaktywnością organizmów (intensywnością reakcji organizmu na bodziec zewnętrzny);

- Pyły wyjątkowo szkodliwe, które prowadzą do rozwoju pylic płucnych, a w szczególności jej najbardziej szkodliwej formy: krzemicy. W tym aspekcie niebezpieczne są pyły zawierające wolną krzemionkę ( $\text{SiO}_2$ ). Równie groźny dla zdrowia jest azbest, który wymaga szczególnych środków ostrożności oraz stosowania odpowiednich metod ochrony zdrowia pracowników;
- Pyły uczulające, pochodzące z drewna, bawełny i wełny, mogą być źródłem alergii, chronicznych stanów zapalnych górnych dróg oddechowych (chroniczny katar);
- Pyły neutralne i mniej szkodliwe. Za mniej szkodliwe uznaje się pyły związków wapnia, magnezu i żelaza.

Należy zaznaczyć, że każdy pył w dużej ilości wdychany przez człowieka jest niebezpieczny i może przyczynić się do rozwoju schorzeń układu oddechowego. Jak wspomniano, pyły wpływają negatywnie na zdrowie ludzi i zwierząt, a także zaburzają funkcje fizjologiczne roślin oraz prowadzą do niszczenia materiałów budowlanych. Pyły w powietrzu są również obecne podczas niebezpiecznego zjawiska smogu. Literatura wyróżnia trzy typy smogu (rysunek 3) [Saleem, Awan 2024]: smog typu londyńskiego, smog fotochemiczny oraz smog typu polskiego, które charakteryzują się różnymi właściwościami. W obecności w powietrzu dwutlenku siarki, pochodzącego ze spalania słabej jakości węgla, i przy wysokiej wilgotności względnej powietrza, w warunkach inwersji temperaturowej, dochodzi do powstania smogu typu londyńskiego. Taki kwaśny smog w postaci mgły zamiast unosić się, spowija miasto, zagrażając zdrowiu jego mieszkańców. Zjawisko to podrażnia drogi oddechowe oraz układ krążenia organizmów żywych. Podczas wystąpienia smogu kwaśnego w Londynie w 1952 roku w ciągu kilku dni zmarło ponad 4000 osób. Nie można pominąć smogu fotochemicznego, który pojawia się latem w okresach intensywnego nasłonecznienia. Powstaje przy bezwietrznej pogodzie i wysokiej temperaturze, kiedy promieniowanie UV inicjuje reakcje chemiczne pomiędzy lotnymi związkami organicznymi, tlenkami azotu i rodnikami hydroksylowymi. Reakcje prowadzą do powstania cząstek wtórnych, w tym silnie utleniającego ozonu troposferycznego. Za smog fotochemiczny odpowiada miejski transport samochodowy oraz emisje przemysłowe oraz pożary lasów. Ozon, pyły

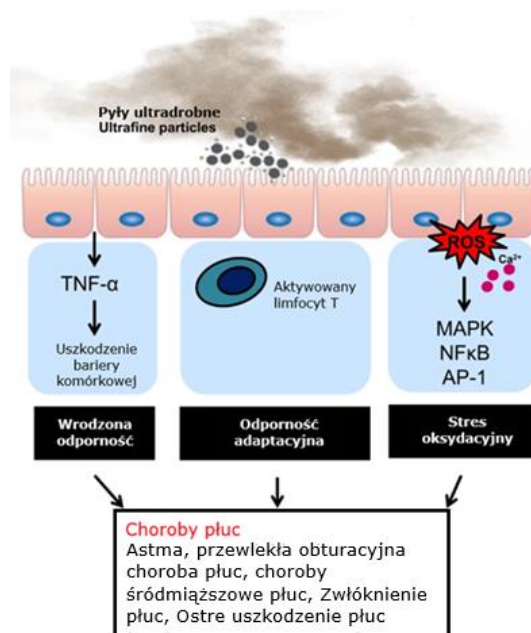
i inne produkty smogu fotochemicznego prowadzą do ciężkich chorób układu oddechowego. Ponadto zjawisko przyczynia się do niszczenia upraw rolnych. Trzecim typem jest smog typu polskiego, który powstaje w okresie zimowym w warunkach wysokiego ciśnienia i słabej prędkości wiatru. Przeważają w nim zanieczyszczenia pochodzące ze spalania paliw stałych wykorzystywanych do ogrzewania budynków. Składa się on z dużej ilości wyemitowanych pyłów zawieszonych oraz zawartych w nich wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych oraz metali ciężkich. Zjawisko jest szczególnie niebezpieczne dla organizmów żywych, powodując podrażnienie i choroby układu oddechowego, naczyniowego i hormonalnego, a także nowotwory. Mechanizm powstawania różnych rodzajów smogu przedstawiono na rysunku 3. O szkodliwości pyłu informuje również WHO, potwierdzając negatywny wpływ pyłów zawieszonych, które mogą nasilać wiele chorób, zaburzeń, a także doprowadzić do śmierci. Im bardziej zurbanizowany i uprzemysłowiony obszar, tym wpływ zanieczyszczeń jest większy [Ciepiela, Sobczyk 2018b; Janka 2014; Krystek 2018; Lewandowski, Klugmann-Radziemska 2017; Saleem, Awan 2024].



**Rys. 3.** Rodzaje smogu oraz ich skład  
Źródło: [Saleem, Awan 2024]

Do niebezpiecznej grupy zanieczyszczeń należy również pył ultradrobny, którego źródłem jest transport lotniczy. Większe cząstki pyłu zatrzymywane są w jamie nosowej i gardle, natomiast pył drobny jest bardziej szkodliwy, ponieważ

przenika do krwiobiegu. Ultradrobny pył powoduje aktywację stresu oksydacyjnego oraz reaktywnych form tlenu, stymulując w ten sposób wrodzone i nabyte odpowiedzi immunologiczne. To z kolei może przyczynić się do rozwoju i nasilenia chorób układu oddechowego, takich jak astma oskrzelowa, przewlekła obturacyjna choroba płuc (POChP), włóknienie płuc oraz rak płuc, co przedstawiono na rysunku 4 [Leikauf i in. 2020; Selley i in. 2021]. Każdy rodzaj pyłu może wywołać trudności z oddychaniem, kichanie, kaszel, pylicę płuc, rozedmę płuc, a nawet nowotwory. Najbardziej narażone są osoby starsze, osoby chorujące na astmę oraz dzieci, które wdychają więcej powietrza w przeliczeniu na kilogram masy ciała niż osoby dorosłe [Kuchcik, Milewski 2018].



**Rys. 4.** Mechanizm chorób płuc wywołanych przez pył ultradrobny  
Źródło: [Leikauf i in. 2020]

Kolejnym aspektem wpływu pyłów zawieszonych jest ich oddziaływanie na środowisko nie tylko w kontekście zdrowia ludzi, ale także zjawisk atmosferycznych, takich jak rozpraszanie sztucznego światła. Pyły pochodzące zarówno z działalności przemysłowej, jak i naturalne, mogą przyczyniać się do zmian w jasności nocnego nieba. Badania przeprowadzone w południowej Polsce w latach 2009-2016 wykazały wpływ pyłów na zwiększoną poświatę nocnego nieba, a ich koncentracja wiązała się z rozpraszaniem światła, szczególnie w okresie zimowym. Projektowanie oświetlenia miejskiego wymaga zrównoważenia bezpieczeństwa publicznego i minimalizowania nadmiernej emisji świetlnej. Problem ten jest szczególnie istotny w regionach, gdzie węgiel stanowi

główne źródło energii, którego spalanie zwiększa emisję zanieczyszczeń do atmosfery [Ścieżor, Czaplicka 2020; Czaplicka, Czaplicka 2022].

Długotrwałe osadzanie się pyłów zaburza trwałość oraz estetykę struktur materiałów budowlanych. Ma to poważne konsekwencje dla zachowania dziedzictwa kulturowego. Pyły osadzają się nie tylko na zewnętrznych powierzchniach budynków, ale również przedostają się do wnętrza, gdzie osiadają na ścianach, podłogach oraz wyposażeniu. Chroniczne narażenie na depozycję pyłów skutkuje obniżeniem trwałości lakierów, prowadząc do przebarwień i łuszczenia, co zmusza do częstszej konserwacji i większych nakładów finansowych [Juda-Rezler, Toczko (red.) 2016; Zimny 2005].

Poza środowiskiem człowieka zanieczyszczenie pyłowe negatywnie oddziałuje na świat roślin oraz zwierząt. U roślin cząstki pyłu zatykają szparki i zwalniają tempo transpiracji. Ograniczenie nasłonecznienia przez osadzające się pyły zakłóca proces fotosyntezy. W regionach o wysokim stopniu zapylenia zaobserwowano zmniejszenie efektywności upraw rolniczych. Badania wykazały, że toksyczne pyły uszkadzają części roślin i kumulują się w ich tkankach. Osadzanie się pyłów na glebie oraz wodzie zmienia ich właściwości, na przykład wartość pH, co w dłuższym czasie prowadzi do wymierania wrażliwych gatunków roślin oraz pojawiania się innej roślinności. U zwierząt dochodzi do wdychania zanieczyszczonego powietrza oraz spożywania zanieczyszczonego pokarmu. Zmiana właściwości gleby oraz wody prowadzi do licznych chorób oraz śmiertelności gatunków zwierząt, podobnie jak w przypadku roślin. [Bell, Treshow 2004; Reymer 1997; Sobczyk 2014].

## **2.4. Rozprzestrzenianie się pyłów w atmosferze**

Rozprzestrzenianie się pyłu w atmosferze zachodzi natychmiast po jego wyemitowaniu. Obłok zanieczyszczeń wydostający się z komina składa się z cząstek różnej wielkości. Z uwagi na masę pył może samoistnie opadać na powierzchnię. Zróżnicowany rozkład wielkości cząstek ma istotny wpływ na tempo ich osadzania i zasięg przemieszczania w atmosferze. Większe cząstki, które mają ponad 20  $\mu\text{m}$  średnicy, opadają szybciej. Cząstki o średnicy 0,2  $\mu\text{m}$  osadzają się wolniej, co powoduje, że podlegają przemieszczaniu na duże odległości, nawet

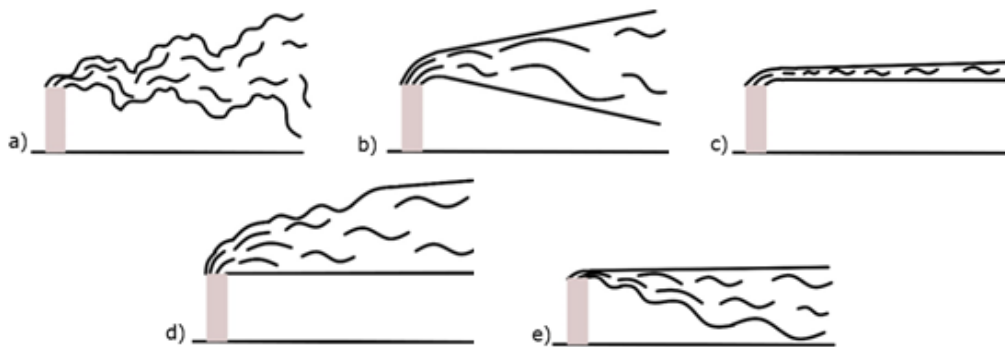
przekraczające 1000 km. Pyły po przedostaniu się na ziemię lub do wody ulegają sorpcji [Kleczkowski 2020; Mazur 2004; Rup 2017]. Cząstki transgraniczne mogą mieć dominujący udział w ogólnym bilansie pyłów na danym obszarze [Bell, Treshow 2004].

Typ wyemitowanej smugi jest zależny od parametrów emitora, ale także mas powietrza, które będą oddziaływać na zanieczyszczenia. W literaturze opisano pięć typów smug (rysunek 5) [Pałasz 2016; Wierzbińska, Szczepaniak 2021]:

- a) Typ pętlowy – w tym przypadku smuga zanieczyszczeń w zależności od wysokości emitora unosi się i opada wskutek prędkości i kierunku wiatru. Zanieczyszczenia gwałtownie się rozprzestrzeniają, a w obecności opadających prądów mogą stykać się z powierzchnią terenu. Zjawisko występuje najczęściej w ciągu dnia przy częściowym zachmurzeniu i niestabilnej atmosferze;
- b) Typ stożkowy – obserwuje się kształt w formie stożka, który rozszerza się od emitora. Smugi występują przy słabej turbulencji, gdy w powietrzu utrzymuje się stan zbliżony do stałej równowagi pionowej. Wraz z odległością smuga styka się z powierzchnią terenu. Zjawisko może wystąpić o każdej porze dnia, przy dużym zachmurzeniu i dużej prędkości wiatru;
- c) Typ wentylacyjny – tworzy się w przypadku, gdy termiczna warstwa inwersyjna powietrza znajduje się zarówno poniżej, jak i powyżej źródła emisji zanieczyszczeń wysokiego emitora. W takich warunkach smuga nie styka się z powierzchnią terenu nawet na dalekich odległościach, co skutkuje niskim stężeniem zanieczyszczeń, nawet przez kilka dni. Typ wentylacyjny powstaje najczęściej w nocy oraz nad ranem, szczególnie podczas mgieł. W przypadku niskich emitatorów może występować wysokie stężenie zanieczyszczeń przy powierzchni terenu;
- d) Typ trasujący – charakteryzuje się unoszeniem smugi powyżej warstwy inwersyjnej. Typ formuje się, gdy inwersja temperatury występuje poniżej źródła emisji zanieczyszczeń, natomiast powyżej jej źródła występuje stan równowagi termicznej nieustalonej. W takich warunkach zanieczyszczenia są rozpraszane na duże odległości, a w otoczeniu emitora, przy powierzchni terenu, występuje niskie stężenie zanieczyszczeń. Smuga wentylacyjna formuje się najczęściej rano oraz wieczorem, gdy warstwa hamująca nie

rozszybia się wysoko, co pozwala zanieczyszczeniom na rozprzestrzenianie się do wyższych warstw atmosfery;

- e) Typ zanieczyszczający – jest najbardziej niekorzystnym typem smugi, kiedy wyniesienie zanieczyszczeń do wyższych warstw atmosfery jest ograniczone termiczną warstwą hamującą. Przy powierzchni terenu natomiast występują warunki równowagi chwiejnej, co prowadzi do gromadzenia się zanieczyszczeń. Typ zanieczyszczający można najczęściej zaobserwować wczesnym rankiem, kiedy wschodzące słońce prowadzi do zaniku termicznych warstw hamujących oraz do unoszenia się mgieł. W zimowym okresie wysokie stężenie zanieczyszczeń utrzymuje się nawet przez kilka dni, a w okresie letnim występuje krótko.



**Rys. 5.** Rodzaje smug kominowych: a) pętlowa, b) stożkowa, c) wentylacyjna, d) trasująca, e) zanieczyszczająca

Źródło: [Wierzbińska, Szczepaniak 2021]

Dyspersja, czyli proces rozpraszania składnika w danym ośrodku, jakim jest powietrze, prowadzący do transportu masy, zależy od trzech grup czynników: mikroklimatycznych, topograficznych oraz technicznych. Niewątpliwie decydujący wpływ mają czynniki meteorologiczne, gdyż parametry klimatyczne podlegają największym zmianom w wyniku turbulencji atmosfery, pionowego gradientu temperatury, działania wiatru i opadu atmosferycznego [Ciepiela, Sobczyk 2023; Krystek (red.) 2018; Połec, Tępiński 2019; Wielgosiński, Zarzycki 2018].

### **Czynniki meteorologiczne**

Wśród czynników mikroklimatycznych wpływających na stopień rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń należy wymienić przede wszystkim stan pionowej równowagi atmosfery, definiowany przez różnicę pomiędzy rzeczywistym pionowym gradientem temperatury powietrza a gradientami suchoadiabatycznym

lub wilgotnoadiabaticznym. Stopień dyspersji zależy od położenia geograficznego analizowanego obszaru, pory roku, ale także pory dnia. W praktyce do określenia wpływu termicznej i dynamicznej równowagi atmosfery na dyspersję zanieczyszczeń stosuje się rozszerzoną klasyfikację stanów równowagi opracowaną przez Franka Pasquilla i Daniela Gilforda, którą przedstawiono w tabeli 1. Klasyfikacja uwzględnia przejście od równowagi silnie chwiejnej do równowagi stałej. Stan równowagi chwiejnej występuje wówczas, gdy przesunięte powietrze w pionie kontynuuje swój ruch w tym samym kierunku z uwagi na wyższą temperaturę przy wznoszeniu oraz niższą przy opadaniu, czyli gdy pionowy gradient temperatury jest większy od gradientu suchoadiabatycznego oraz wilgotnoadiabatycznego. Równowagę obojętną obserwuje się w momencie, kiedy przesunięte powietrze pozostaje na wysokości wskutek takiej samej temperatury, jak temperatura otoczenia, a więc gdy pionowy gradient temperatury jest równy gradientowi suchoadiabatycznemu oraz wilgotnoadiabatycznemu. Równowaga stała ma miejsce, gdy przesunięte powietrze w pionie powraca do swojej pierwotnej pozycji, gdyż temperatura powietrza jest niższa przy wznoszeniu oraz wyższa przy opadaniu. W tym przypadku pionowy gradient temperatury jest mniejszy od gradientu suchoadiabatycznego oraz wilgotnoadiabatycznego [Korzeniowska-Rejmer, Generowicz 2012; Krystek (red.) 2018; Wołoszyn 2009].

**Tabela 1.** Klasyfikacja stanów termicznej oraz dynamicznej równowagi atmosfery według Pasquilla i Gilforda

<b>Stan równowagi atmosfery</b>	<b>Rodzaj równowagi</b>
1 (A)	Silnie chwiejna
2 (B)	Chwiejna
3 (C)	Lekko chwiejna
4 (D)	Obojętna
5 (E)	Lekko stała
6 (F)	Staża

Źródło: [Krystek (red.) 2018]

Pionowa stateczność powietrza jest ważnym parametrem fizycznym atmosfery. Trzy stopnie tego parametru to: inwersja, konwekcja i izotermia. Inwersja występuje w sytuacji, gdy temperatura przy powierzchni jest niższa od tej w wyższych warstwach atmosfery. Literatura [Kleczkowski 2020] wyróżnia:

- Inwersje radiacyjne - występują najczęściej nocą oraz w okresie zimowym, gdy powierzchnia gruntu szybko traci ciepło. Powoduje to schłodzenie

przylegających warstw atmosfery, co prowadzi do ich większej gęstości i ograniczenia rozprzestrzeniania zanieczyszczeń;

- Inwersje mechaniczne - tworzą się podczas układów wyżowych, kiedy zimne powietrze osiada, tworząc stabilne warstwy utrudniające mieszanie komponentów powietrza. Zjawisko prowadzi do zwiększonego stężenia zanieczyszczeń na danym obszarze;
- Inwersje frontowe - występują podczas napływu ciepłego powietrza nad chłodne po przeciwnej stronie frontu. Taki układ jest stabilny po obu stronach frontu i sprzyja zwiększonemu stężeniu zanieczyszczeń;
- Inwersje adwekcyjne - powstają podczas poziomego ruchu powietrza napływającego nad chłodną powierzchnię terenu lub chłodną warstwę atmosfery. Skutkuje to nawarstwianiem się ciepłego powietrza nad chłodnym i pogorszeniem jakości powietrza.

Konwekcja występuje wówczas, gdy warstwa powietrza przy powierzchni gruntu jest cieplejsza i mniej gęsta od tego w wyższych warstwach atmosfery. Najczęściej występuje w okresie letnim, kiedy powierzchnia terenu nagrzewa się szybciej niż powietrze. Ciepłe powietrze unosi się, a chłodniejsze i gęstsze opada, co wpływa na pionowe mieszanie się warstw. Proces przyspiesza dyspersję zanieczyszczeń, które przenikają do wyższych warstw atmosfery. Izotermia następuje, gdy temperatura na wysokości 30 metrów nad powierzchnią terenu jest stała. Zjawisko jest powszechne przy dużym zachmurzeniu, kiedy chmury zapobiegają nagrzewaniu się warstw powietrza przy powierzchni gruntu. Izotermia występuje również w okresie zimowym przy bezchmurnym niebie, kiedy nagrzewanie niższych warstw atmosfery jest ograniczone. Prowadzi to najczęściej do wysokiego stężenia zanieczyszczeń przy powierzchni gruntu. Warto podkreślić, że pionową stateczność powietrza określa się za pomocą gradientu temperatury, czyli różnicy między temperaturą powierzchni terenu a temperaturą na wysokości 2 metrów. Ujemny gradient oznacza inwersję, dodatni - konwekcję, a gradient bliski zeru wskazuje na izotermię [Korzeniowska-Rejmer, Generowicz 2012].

Równie istotny jest poziomy ruch powietrza, czyli prędkość, kierunek oraz turbulencja wiatru. Ruch poziomy występuje w wyniku różnicy ciśnień na danym obszarze. W stopniu rozpraszania się zanieczyszczeń uwzględnia się rzeczywiste rozkłady prędkości i kierunki wiatru przy powierzchni terenu oraz czas ich

występowania. Przyjmuje się, że stopień stężenia zanieczyszczeń jest odwrotnie proporcjonalny do prędkości wiatru. Wraz z oddalaniem się od źródła emisji część zanieczyszczeń unosi się do wyższych warstw atmosfery, kiedy w niższych warstwach ich ilość maleje. Większe prędkości wiatru sprzyjają większemu zasięgowi rozprzestrzeniania zanieczyszczeń. Smuga zanieczyszczeń przemieszcza się z prędkością otaczających mas powietrza, a zmiana ich kierunku skutkuje zmianą przemieszczania się zanieczyszczeń. W wyniku turbulencji atmosferycznej i mieszania się obłoku z otaczającym powietrzem, jego objętość stopniowo rośnie, a stężenie zanieczyszczeń maleje wraz z oddalaniem się od źródła emisji. Obserwuje się najczęściej obłok w kształcie półstożka z wierzchołkiem w punkcie emisji. Najbardziej niekorzystne warunki występują przy słabych prędkościach wiatru (poniżej 2 m/s) oraz podczas zjawiska cisz wiatrowych [Korzeniowska-Rejmer, Generowicz 2012; Pałasz 2016].

Na stopień dyspersji zanieczyszczeń wpływa również temperatura powietrza, która kształtuje wiele procesów fizycznych oraz chemicznych w atmosferze. Do tych procesów zalicza się koagulację, sorpcję oraz dyfuzję. Dużą rolę odgrywa różnica temperatur pomiędzy emitowanymi zanieczyszczeniami a otaczającym powietrzem. Szczególnie zimą rozkład temperatur przy powierzchni terenu ma duże znaczenie w rozpraszaniu zanieczyszczeń: gorące gazy unoszą się szybciej w chłodnym otoczeniu w wyniku różnicy gęstości. W rezultacie prowadzi to do lepszej dyspersji zanieczyszczeń, ale przy tym sprzyja powstawaniu reakcji chemicznych między substancjami zawartymi w powietrzu [Bokwa 2007; Kosiński 1961]. Badania w Chinach w 2020 roku wykazały, że wyższe temperatury powietrza sprzyjają redukcji stężenia zanieczyszczeń, szczególnie na większych wysokościach. W niektórych regionach natomiast, np. w północnej części Chin, wyższa temperatura przyczyniła się do większego stężenia zanieczyszczeń. Jest to zjawisko bardzo złożone, na które składają się mikroklimat i lokalne warunki. Warto również wspomnieć, że wysoka temperatura sprzyja intensywniejszemu parowaniu, co prowadzi do wzrostu poziomu wilgotności względnej powietrza, odpowiedzialnej za jakość powietrza [Liu i in. 2020].

Na stopień zanieczyszczenia wpływ mają układy ciśnienia. Podczas niżów powietrze wznosi się, co sprzyja rozprzestrzenianiu zanieczyszczeń. Często występuje duże zachmurzenie, które stabilizuje stan atmosfery, ale także ogranicza nagrzewanie się powierzchni terenu w dzień i ochładzania w nocy. Wyższe

natomiast charakteryzują się zagęszczeniem i osiadaniem powietrza oraz wystąpieniem warstwy inwersyjnej, która ogranicza wymianę powietrza. Stabilne warunki w wyżu sprzyjają nagrzewaniu się powierzchni w dzień i szybkiemu schładzaniu w nocy. Szczególnie tereny położone w niecce, w tym Kraków, narażone są na stagnację chłodnego powietrza, co sprzyja tworzeniu inwersji. W obecności rzeki lub innych zbiorników wodnych mogą powstawać mgły, które nasilają to zjawisko [Kleczkowski 2020].

Kolejnym elementem jest wilgotność względna powietrza, czyli procentowy stosunek aktualnej ilości pary wodnej w powietrzu do maksymalnej możliwej ilości pary wodnej, którą powietrze może zawierać w danej temperaturze. W wielu badaniach zaobserwowano, że w warunkach zwiększonej wilgotności dochodzi do łączenia się cząsteczek pyłu w większe cząstki i zmniejszenia ich ilości w środowisku. Natomiast wyniki pomiarów depozycji pyłów w Pekinie (2014-2015) pokazały, że wysoka wilgotność zmniejsza prędkość depozycji, o czym wspomniano w następnym podrozdziale [Kosiński 1961; Rozporządzenie Ministra Środowiska 2010; Zhu i in. 2016]. Należy podkreślić, że aktywność niektórych związków gazowych, np. tlenków siarki, zwiększa się przy dużej zawartości pary wodnej w powietrzu. Jeśli wilgotność względna przekracza 70%, to zauważalne jest przyśpieszenie konwersji  $\text{SO}_2$  do kwasu siarkowego w atmosferze. Proces konwersji zachodzi podczas kondensacji pary wodnej, ale także w obecności katalizatorów, takich jak żelazo, miedź lub mangan [Wierzbińska 2017].

Tak jak w przypadku wilgotności powietrza opady atmosferyczne jako naturalne zjawisko oczyszczania atmosfery wpływają na obniżenie stężenia zanieczyszczeń. W oczyszczaniu zapyłonego powietrza istotną rolę odgrywa średnica kropeł deszczu. Najlepsze właściwości oczyszczania zapewniają krople o średnicy 0,45 mm. Oprócz rozmiaru kropeł deszczu, istotnym czynnikiem wpływającym na oczyszczanie powietrza jest początkowe stężenie zanieczyszczeń, które decyduje o efektywności usuwania cząstek z atmosfery. Badania w Chinach (w miastach Jinan i Qingdao) w 2021 roku [Tian, Cui 2021] wykazały, że im większe było początkowe stężenie pyłów  $\text{PM}_{2,5}$  i  $\text{PM}_{10}$ , tym opady miały większy efekt oczyszczający. W szczególności opady deszczu mogą obniżyć wskaźnik jakości powietrza (*AQI*) nawet o 32%, a stężenie  $\text{PM}_{2,5}$  o 42%. Opad śniegu również poprawia jakość powietrza z uwagi na dużą powierzchnię chłonną i małą prędkość opadania [Kosiński 1961; Tian, Cui 2021].

## Czynniki topograficzne

Kolejną grupą wpływającą na rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń w powietrzu są czynniki topograficzne. Zalicza się do nich rodzaj ukształtowania terenu, jego pokrycie oraz zagospodarowanie. Dokładne parametry współczynnika aerodynamicznego szorstkości terenu  $z_0$  wyznacza się na podstawie danych (tabela 2) zawartych w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 26 stycznia 2010 r. w sprawie wartości odniesienia dla niektórych substancji w powietrzu, według wzoru (1) [Rozporządzenie Ministra Środowiska 2010; Wierzińska 2017].

$$z_0 = \frac{1}{F} \sum_c F_c * z_{0c} \quad (1)$$

Gdzie:  $z_0$  – średnia wartość współczynnika aerodynamicznej szorstkości terenu na obszarze objętym obliczeniami, m;  $F$  – powierzchnia obszaru objętego obliczeniami, m<sup>2</sup>;  $c$  – numer obszaru o danym typie pokrycia terenu, -.

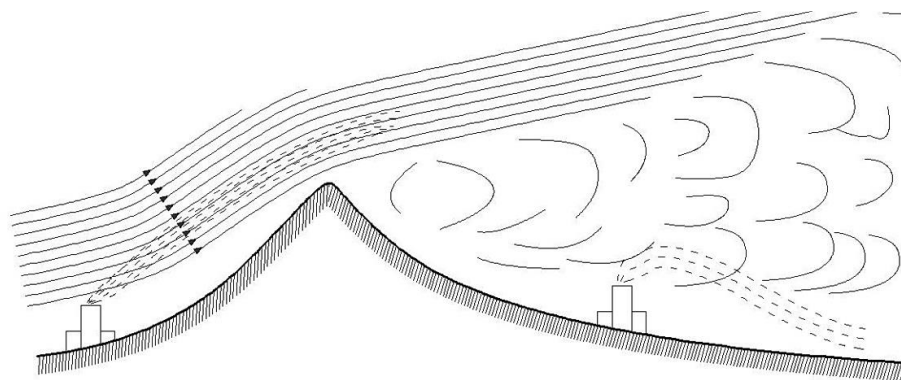
**Tabela 2.** Wartości współczynnika aerodynamicznej szorstkości terenu  $z_0$

Lp. (1)	Typ pokrycia terenu (2)	Współczynnik $z_0$ (3)	Lp. (1)	Typ pokrycia terenu (2)	Współczynnik $z_0$ (3)
1	Woda	0,00008	8.2	- Zabudowa średnia	2,0
2	Łąki, pastwiska	0,02	9	Miasto od 100 tys. do 500 tys. mieszkańców	-
3	Pola uprawne	0,035	9.1	- Zabudowa niska	0,5
4	Sady, zarośla zagajniki	0,4	9.2	- Zabudowa średnia	2,0
5	Lasy	2,0	9.3	- Zabudowa wysoka	3,0
6	Zwarta zabudowa wiejska	0,5	10	Miasto powyżej 500 tys. mieszkańców	-
7	Miasto do 10 tys. mieszkańców	1,0	10.1	- Zabudowa niska	0,5
8	Miasto od 10 tys. do 100 tys. mieszkańców	-	10.2	- Zabudowa średnia	2,0
8.1	- Zabudowa niska	0,5	10.3	- Zabudowa wysoka	5,0

Źródło: [Rozporządzenie Ministra Środowiska 2010]

Czynniki topograficzne mogą wpływać bezpośrednio (oddziaływanie lokalne, w małej skali w pobliżu przeszkód terenowych) oraz pośrednio (oddziaływanie

regionalne, w dużej skali) na wartość czynników mikroklimatycznych. W momencie kiedy smuga zanieczyszczeń napotyka na przeszkody terenowe, dochodzi do zakłóceń prędkości i kierunku wiatru. Przykład zakłóceń przedstawiono na rysunku 6, kiedy smuga napotyka na przeszkodę w postaci wzgórza. Strumienie płyną z dużą prędkością ponad wzgórzem, ulegają silnym zawirowaniom, a następnie gwałtownie zwalniają za przeszkodą (cień aerodynamiczny). W cieniu aerodynamicznym jest ograniczone przewietrzanie, w wyniku czego następuje pogorszenie jakości powietrza. Przyjmuje się, że długość cienia aerodynamicznego równa się sześciokrotnej wysokości przeszkody. Duża liczba napotkanych przeszkód całkowicie zaburza przepływ powietrza, a co za tym idzie, przemieszczanie się zanieczyszczeń poza dany obszar [Janka 2014; Korzeniowska-Rejmer, Generowicz 2012; Wierzińska 2017].



**Rys. 6.** Schemat wpływu wzgórza na rozprzestrzenianie się smugi zanieczyszczeń  
Źródło: [Wierzińska 2017]

Wart uwagi jest wpływ zadrzewień na obłok zanieczyszczeń. W pobliżu lasu smuga unosi się ponad wierzchołkami drzew, a nieregularna powierzchnia w koronach drzew wywołuje wiry powietrzne oraz przenikanie zanieczyszczeń do wnętrza lasu. Dlatego tak ważne są pasy zieleni, które rozpraszają zanieczyszczenia. Dzięki fitoncydom (związkom chemicznym o właściwościach bakteriobójczych, grzybobójczych i pierwotniakobójczych) uwalnianym przez rośliny dochodzi do redukcji szkodliwych zanieczyszczeń w powietrzu, a także do hamowania rozwoju mikroorganizmów. Zakłada się, że z powierzchni jednego hektara lasu liściastego w ciągu 24 godzin może uwolnić się nawet 20 kg fitoncydów [Korzeniowska-Rejmer, Generowicz 2012].

## **Czynniki techniczne**

Czynniki techniczne związane są bezpośrednio z parametrami emitatorów (wysokość, średnica) oraz charakterystyką ich pracy (czas pracy, temperatura i prędkość zanieczyszczeń na wylocie). Dużą rolę odgrywa rodzaj emisji: czy emisja następuje z jednego dużego emitatora punktowego (wysoka emisja), czy z wielu rozproszonych emitatorów (niska emisja) i niekontrolowanej emisji w wyniku spalania paliw stałych. Nieodzowne zatem jest utrzymywanie urządzeń w dobrym stanie, ich regularna kontrola, stosowanie technologii i urządzeń niskoemisyjnych oraz zastosowanie odpowiednich metod neutralizacji zanieczyszczeń. W przypadku odpylania najczęściej stosuje się cyklony oraz elektrofiltry. Do eliminacji bardzo małych cząstek, poza elektrofiltrami, konieczne jest zastosowanie odpylania mokrego lub technik filtracyjnych. Wszystkie czynniki techniczne determinują ilość zanieczyszczeń emitowanych do środowiska przyrodniczego [Janka 2014; Krystek (red.) 2018; Lewandowski, Aranowski 2016].

## **2.5. Teoretyczne podstawy modelowania dyspersji zanieczyszczeń**

Metody analizy rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w powietrzu są skomplikowane, ponieważ muszą uwzględniać zjawiska zachodzące w środowisku, takie jak wentylacja pozioma i pionowa, mieszanie powietrza oraz turbulencja [Jarzyna 2006; Pałasz 2016].

Duże cząstki ziaren poddawane są sile ciężkości. Prędkość osiadania cząstek (depozycja) zależy od ich wielkości oraz wilgotności, co zostało przedstawione w tabeli 3. Na podstawie badań w Pekinie (2014-2015) określono, że w okresie suchym prędkość osadzania pyłów zawieszonych jest wyższa w stosunku do okresu wilgotnego. Dla pyłu PM<sub>2,5</sub> wartość ta wynosi od 0,05 cm/s do 0,11 cm/s w okresie wilgotnym, od 0,15 cm/s do 0,17 cm/s w okresie normalnym oraz od 0,71 cm/s do 2,29 cm/s w okresie suchym. Na szybkość osadzania się cząstek w okresie wilgotnym miały wpływ bardziej intensywne czynniki meteorologiczne (np. prędkość i kierunek wiatru). W przypadku pyłów PM<sub>10</sub> tendencja jest podobna: pył wilgotny osadza się z mniejszą prędkością niż pył suchy [Zhu i in. 2016]. Istotne są również właściwości podłoża, do których zalicza się pokrycie i szorstkość

terenu. Suche osiadanie wpływa na wszystkie odsłonięte powierzchnie i jest procesem ciągłym [Juda-Rezler, Toczko (red.) 2016].

**Tabela 3.** Prędkość suchego osadzania cząstek PM<sub>2,5</sub> i PM<sub>10</sub> w różnych okresach

Pył zawieszony	Okres	Prędkość osadzania (cm/s)
PM <sub>2,5</sub>	Wilgotny	od 0,05 do 0,11
	Normalny	od 0,15 do 0,17
	Suchy	od 0,71 do 2,29
PM <sub>10</sub>	Wilgotny	od 1,21 do 1,91
	Normalny	od 3,66 do 6,10
	Suchy	od 6,67 do 11,67

Źródło: [Zhu i in. 2016]

W przypadku pyłu opadającego efektywna wysokość komina, opisana we wzorze (2), zmniejsza się, ponieważ cząstki opadają, co oznacza, że ich rzeczywista wysokość emisji w atmosferze jest mniejsza niż wysokość komina. W miarę oddalania się od komina emitora cząstki opadają na niższe warstwy atmosfery, co powoduje dalsze obniżenie efektywnej wysokości. Ponadto im większa jest prędkość wiatru, tym dalej zanieczyszczenia będą się rozprzestrzeniać [Rup 2017; Wielgosiński, Zarzycki 2018].

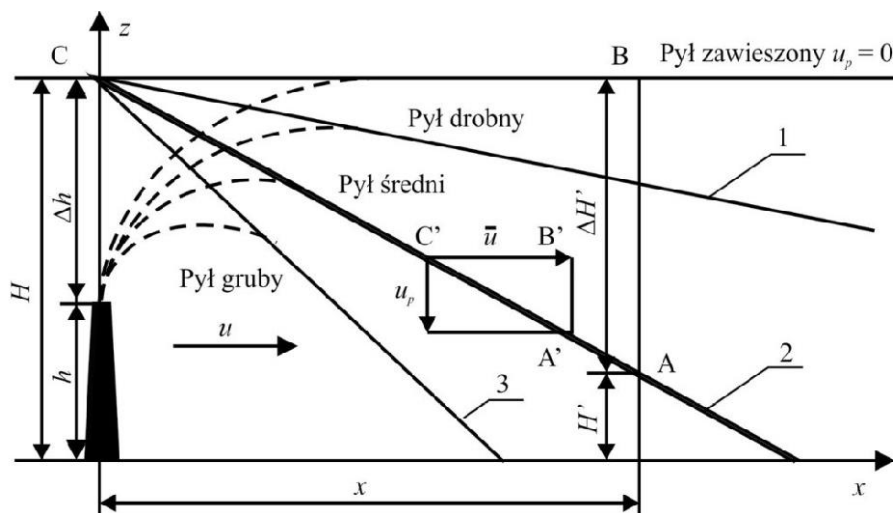
$$H' + \Delta H = H \quad (2)$$

Gdzie:  $\Delta H$  – obniżenie efektywnej wysokości komina, m;  $H$  – efektywna wysokość komina dla zanieczyszczenia gazowego ( $H = h + \Delta H$ ), m;  $H'$  – efektywna wysokość komina dla pyłu, m.

Równanie efektywnej wysokości komina uzupełnia rysunek 7, który przedstawia wyemitowany pył, który opada z prędkością  $u_p$ . Model zakłada opad trzech różnych frakcji pyłu (drobnej, średniej oraz grubej) w określonej odległości  $x$  od emitora. Im drobniejszy jest pył, tym dłużej będzie przenoszony wraz z wiatrem, a jego odległość opadu na powierzchnię będzie większa od pyłu o większej frakcji. Stąd można zapisać równanie (3) [Wielgosiński, Zarzycki 2018].

$$\Delta H = x * \frac{u_p}{\bar{u}} \quad (3)$$

Gdzie:  $\Delta H$  – obniżenie efektywnej wysokości kominu, m;  $x$  – odległość pozioma od punktu emisji, m;  $u_p$  – prędkość opadania cząstek pyłu, m/s;  $u$  – prędkość wiatru, m/s.



**Rys. 7.** Rozprzestrzenianie się pyłu w atmosferze  
Źródło: [Wielgosiński, Zarzycki 2018]

Warto podkreślić, że wyniesienie, czyli wysokość, na jaką unoszą się zanieczyszczenia z kominu, wzrasta proporcjonalnie ze średnicą kominu, prędkością spalin oraz różnicą temperatur między spalinami a otaczającym powietrzem. Im większe wartości tych czynników, tym wyżej zanieczyszczenia są unoszone. W przypadku wysokich kominów przemysłowych wyniesienie może osiągać nawet 200 metrów. Aby zanieczyszczenia rozprzestrzeniały się na największe odległości, budowane są bardzo wysokie kominy przekraczające 200 m. Wraz z zastosowanym systemem odpylania spalin uzyskuje się poprawę jakości powietrza w otoczeniu emitora [Kleczkowski 2020; Oruba 2014].

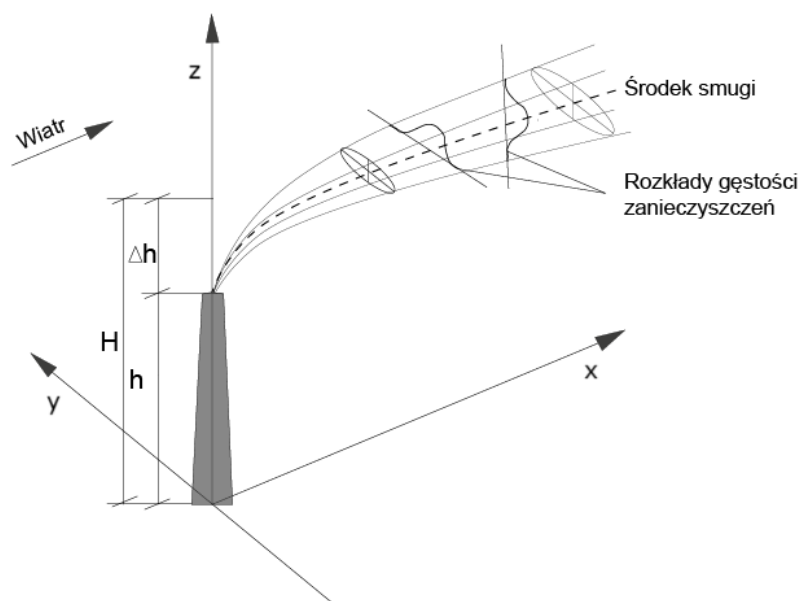
Matematyczne modele służące do symulacji rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w atmosferze są zaawansowanymi narzędziami, które pozwalają na ocenę stanu powietrza oraz przewidywanie narażenia obszarów na wysokie stężenia zanieczyszczeń, szczególnie podczas awarii przemysłowych i katastrof ekologicznych. Ponadto odgrywają istotną rolę na etapie planowania i projektowania zakładów przemysłowych, a także podczas tworzenia programów ochrony środowiska. W analizie dyspersji zanieczyszczeń stosuje się zarówno tradycyjne modele smugi Gaussa, jak i nowoczesne, uwzględniające skalowanie warstwy granicznej, modele smugi segmentowej, a także modele Eulera oraz Lagrange'a [Pomorska, Duda 2007; Tumidajski, Foszcz i in. 2009].

W Polsce do określania oceny oddziaływania na środowisko stosuje się model smugi Gaussa, co jest ujęte w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 26 stycznia 2010 r. w sprawie wartości odniesienia dla niektórych substancji w powietrzu. Podstawowy model Gaussa opiera się na równaniu Pasquilla (4), które bierze pod uwagę podstawowe czynniki meteorologiczne, jak kierunek i prędkość wiatru, stałe właściwości atmosfery, w tym klasy równowagi atmosferycznej i współczynniki dyfuzji atmosferycznej zależne od odległości od źródła emisji. Model uwzględnia sposób zagospodarowania terenu poprzez uśrednioną wartość aerodynamicznego współczynnika szorstkości terenu w danym obszarze obliczeniowym. Możliwe jest zatem określenie rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń ze źródeł punktowych oraz uwzględnienie stabilnych i niestabilnych (konwekcyjnych) warunków mikroklimatycznych. Badania terenowe wykazały, że model dobrze opisuje zmiany stężenia zanieczyszczeń w przekroju smugi dymu, uśrednione w ciągu godziny. Zaletą modelu jest prostota obliczeniowa, co pozwala na szerokie zastosowanie w praktyce, ale także brak ograniczeń związanych z rozdzielczością przestrzenną, co jest znamienne dla bardziej złożonych modeli siatkowych. Metoda ma również pewne ograniczenia, powodujące konieczność wielu korekt, a nawet eliminujące jej zastosowanie. Ograniczeniem są różnorodne i skomplikowane warunki terenowe oraz doliny charakteryzujące się spokojnymi warunkami mikroklimatycznymi. Najlepiej metodę obrazuje schemat rozprzestrzeniania się smugi zanieczyszczeń ze źródła punktowego, przedstawiony na rysunku 8. Smuga ta pochodzi od emitora, który znajduje się na poziomie  $h$  i wznosi się na wysokość  $\Delta h$ . Rysunek 8 ukazuje zmienność koncentracji zanieczyszczeń w kierunkach poziomym ( $x$ ,  $y$ ) oraz pionowym ( $z$ ). Najwyższe stężenie notuje się w jej geometrycznym środku i wraz z oddalaniem od środka maleje [Bell, Treshow 2004; Pomorska, Duda 2007; Kleczkowski 2020; Ministerstwo Środowiska 2003; Oleniacz, Rzeszutek 2015].

$$S_{xyz} = \frac{E_p}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[ \exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] * 1000 \quad (4)$$

Gdzie:  $S_{xyz}$  – stężenie pyłu zawieszonego w punkcie o współrzędnych ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ),  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ;  $E_p$  – emisja pyłu zawieszonego,  $\text{mg}/\text{s}$ ;  $H$  – efektywna wysokość emitora,  $\text{m}$ ;  $u$  – średnia prędkość wiatru w warstwie od geometrycznej wysokości

emitora  $h$  do efektywnej wysokości emitora  $H$ ;  $m/s$ ,  $\sigma_y$  – współczynnik poziomej dyfuzji atmosferycznej,  $m$ ;  $\sigma_z$  – współczynnik pionowej dyfuzji atmosferycznej,  $m$ .



**Rys. 8.** Podstawowe założenia modelu gaussowskiego smugi zanieczyszczeń  
Źródło: [Kleczkowski 2020]

Natomiast średnie stężenie pyłu zawieszonego, występujące w określonej odległości od emitora, można wyliczyć na podstawie funkcji emisji średniej, która opisuje, jak zanieczyszczenia rozprzestrzeniają się i osiadają w atmosferze na skutek działania czynników mikroklimatycznych (wzór 5). Obecność liczby 2 w mianowniku świadczy o założeniu, że 50% pyłu zawieszonego ulega depozycji bez udziału opadów atmosferycznych. Obliczenia są stosowane przy założeniu, że wiatr wieje od źródła emisji do punktu pomiarowego. Aby uzyskać średnie roczne stężenie, sumuje się obliczone stężenia dla wszystkich warunków mikroklimatycznych, biorąc pod uwagę częstotliwość ich występowania w danym sektorze [Oleniacz, Rzeszutek 2015].

$$\bar{S}_x = \frac{r}{2\pi\sqrt{2\pi}} * \frac{\bar{E}_p}{u\sigma_z x} \exp\left(-\frac{H}{2\sigma_z^2}\right) * 1000 \quad (5)$$

Gdzie:  $\bar{S}_x$  – stężenie średnie pyłu zawieszonego,  $\mu g/m^3$ ,  $\bar{E}_p$  – uśredniona emisja pyłu zawieszonego,  $mg/s$ ;  $H$  – efektywna wysokość emitora,  $m$ ;  $\sigma_y$  – współczynnik poziomej dyfuzji atmosferycznej,  $m$ ;  $\sigma_z$  – współczynnik pionowej dyfuzji atmosferycznej,  $m$ ;  $r$  – liczba sektorów róży wiatru (12 lub 16), -.

Ograniczenia w zastosowaniu modelu Gaussa zobligowały naukowców do opracowania bardziej zaawansowanych metod, zwanych modelami obłoków Lagrange'a. Modele umożliwiają w sposób precyzyjny symulację dyspersji zanieczyszczeń w zmiennych warunkach atmosferycznych oraz w różnorodnym terenie. Podejście Lagrange'a opiera się na trajektoriach, ścieżkach mas powietrza w atmosferze, a także łączy analizę pola wiatru i szczegółowe modele meteorologiczne. Masy powietrza poruszają się wraz z wiatrem, toteż w równaniach nie uwzględnia się adwekcji. Zostało to uznane za lepsze rozwiązanie w przypadku długotrwałych zmian w atmosferze, także przy niskiej prędkości wiatru. Ruch każdej cząstki jest efektem ruchu wiatru oraz dyfuzji z turbulencji, która wprowadza nieregularne zmiany w ich trajektoriach. Pole stężenia jest interpretowane jako średnia z wielu trajektorii, gdyż ruch każdej cząstki jest niezależny od ruchu innych cząstek. Dla źródła chwilowego, umieszczonego w określonym punkcie, stężenie można opisać wzorem Csanady'ego (6). Obecność losowych sił, którym poddawane są cząstki, czyni te modele stochastycznymi. Przykładem modelu obłoku jest model *HYSPLIT*, stosowany do analiz rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w prognozach krótkoterminowych oraz długoterminowych dla małych lub dużych obszarów. Ponadto model uwzględnia podejście Eulera do obliczania stężenia na siatce [Anfossi, Physick 2005; Połec, Tępiński 2019].

$$C(x, t) = Q * P(x, t | x_0, t_0) \quad (6)$$

Gdzie:  $C$  – stężenie w czasie  $t$  i w miejscu  $x$ ,  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ;  $Q$  – masa emitowana w momencie  $t$  równego  $0$ ,  $\mu\text{g}$ ;  $P$  - prawdopodobieństwo, że cząstka, która znajdowała się w punkcie  $x_0$  w czasie  $t_0$ , dotrze do punktu  $x$  w czasie  $t$ , -.

Kolejnym przykładem są modele Eulerowskie, które w przeciwieństwie do podejścia Lagrange'a, śledzącej trajektorie w przestrzeni, skupiają się na obliczeniach dla ustalonych punktów przestrzeni, analizując przy tym zmiany lokalne. Wiele modeli za podstawę ma różniczkowy model Eulera. Najprostszym przypadkiem jest równanie używane do obliczania stężeń, przemieszczania oraz depozycji zanieczyszczeń. Podstawą jest równanie dyfuzji molekularnej, które wyraża się wzorem (7) [Anfossi, Physick 2005; Pomorska, Duda 2007].

$$\frac{\partial \mathcal{S}}{\partial t} + \tilde{u} \frac{\partial \mathcal{S}}{\partial x} + \tilde{v} \frac{\partial \mathcal{S}}{\partial y} + \tilde{w} \frac{\partial \mathcal{S}}{\partial z} = D \left( \frac{\partial^2 \mathcal{S}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathcal{S}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \mathcal{S}}{\partial z^2} \right) + I \quad (7)$$

Gdzie:  $S$  – stężenie zanieczyszczenia w punkcie o współrzędnych  $(x, y, z)$ ,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $U$  – wektor wiatru o składowych  $u, v, w$ ,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $D$  – współczynnik dyfuzji molekularnej,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $I$  – funkcja wyrażająca działania objętościowego źródła emisji,  $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ .

Najbardziej zaawansowaną i uniwersalną formą są siatkowe modele Eulerowskie. Siatkowy układ współrzędnych, zastosowany w tych modelach, umożliwia odwzorowanie procesów atmosferycznych na rozległych terenach, jednak ich dokładność jest ograniczona przez rozdzielczość siatki, a ich użycie wiąże się z dużymi wymaganiami obliczeniowymi. Ze względu na podział siatki na komórki modele Eulerowskie nie są w stanie uwzględnić szczegółów stężenia substancji na skalach mniejszych niż rozmiar tych komórek, ponieważ emisje są natychmiast mieszane w obrębie siatki. W tych ograniczeniach stosuje się submodele trajektorii lub dyspersji Gaussa, które obsługują początkowy transport i reakcje chemiczne zanieczyszczeń pochodzących z dużych źródeł punktowych. Te hybrydowe modele minimalizują efekt natychmiastowego rozcieńczenia zanieczyszczeń w całej komórce siatki. Gdy smugi z punktowych źródeł osiągają określoną wielkość, są one włączane do istniejących stężeń w komórkach siatki i podlegają dalszym procesom w modelu [Byun, Lacser 2003; Ministerstwo Środowiska 2003].

Przedstawione modele wykorzystują kluczowe parametry, takie jak stężenie zanieczyszczeń, prędkość wiatru, współczynnik dyfuzji oraz wpływ źródła emisji. Wytyczne Unii Europejskiej wskazują na główne wyzwania związane z weryfikacją wyników modelowania na podstawie danych pomiarowych. Problemy te obejmują błędy i niepewności w pomiarach, nieadekwatność modeli do rzeczywistych warunków, a także błędy w danych wejściowych do modeli jakości powietrza, takich jak wielkość emisji i dane meteorologiczne [Ministerstwo Środowiska 2003; Pomorska, Duda 2007].

## 2.6. Regulacje prawne ochrony powietrza

System prawa jest zbiorem norm ogólnych wyrażonych w aktach normatywnych, które są powiązane i uporządkowane. Normy te obowiązują w danym państwie w określonym czasie. W skład tego systemu wchodzi prawo ochrony środowiska, które jest częścią normatywną regulującą zachowania i postępowania w dziedzinie ochrony środowiska naturalnego. Normy prawne, stanowiące podstawowy element systemu prawnego, mogą przybierać różne formy, takie jak nakazy, zakazy czy pozwolenia, a normy związane z ochroną środowiska są jednym z elementów tego systemu [Karski 2009].

W zestawieniu dotyczącym ochrony powietrza w Polsce znajdują się następujące akty prawne:

- Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska (POŚ). Jest to najważniejszy akt prawny w Polsce dotyczący ochrony środowiska. W dokumencie zawarte są informacje oraz zasady dotyczące korzystania z zasobów środowiska, wprowadzania do niego substancji i energii, a także nakładania kosztów oraz sankcji. W kontekście ochrony powietrza, w Dziale II, wyszczególnione są obowiązki władz oraz instytucji administracyjnych, w celu dotrzymania dopuszczalnych poziomów substancji w powietrzu, za które odpowiedzialni są Minister Środowiska, Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska i Główny Inspektorat Ochrony Środowiska. Dane dotyczące jakości powietrza udostępniane są na stronie Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska. W przypadku przekroczeń poziomów dopuszczalnych, Wojewódzkie Centrum Zarządzania Kryzysowego powiadamia społeczeństwo o zagrożeniu przekroczenia dopuszczalnych poziomów zanieczyszczeń. Warto zaznaczyć, że Sejmik województwa może wprowadzać zakazy lub ograniczenia dotyczące spalania paliw, a marszałek może nakładać obowiązek monitoringu zanieczyszczeń przez podmioty, które korzystają ze środowiska. Wojewoda natomiast nadzoruje realizację programów ochrony powietrza. To właśnie na podstawie POŚ została wprowadzona Uchwała Sejmiku Województwa Małopolskiego z dnia 15 stycznia 2016 r. w sprawie wprowadzenia na obszarze Gminy Miejskiej Kraków ograniczeń w zakresie eksploatacji instalacji, w których następuje spalanie paliw, tzw. Uchwała antysmogowa, co wymusiło na mieszkańcach wymiany źródła ogrzewania na bardziej przyjazne środowisku

[Kaczmarczyk 2017; Prawo Ochrony Środowiska 2001; Siwa 2001; Uchwała 2016];

- Ustawa z dnia 20 lipca 1991 r. o Inspekcji Ochrony Środowiska. Ustawa reguluje działalność Inspekcji Ochrony Środowiska (IOŚ), której zadaniem jest przestrzeganie przepisów dotyczących ochrony środowiska oraz jego monitoring, w tym pomiary zanieczyszczeń powietrza. Ustawa odgrywa istotną rolę w kontrolowaniu źródeł emisji zanieczyszczeń pyłów zawieszonych oraz ocenie ich wpływu na środowisko [Ustawa 1991];
- Ustawa z dnia 3 października 2008 r. o udostępnianiu informacji o środowisku i jego ochronie, a także o stopniu zanieczyszczenia powietrza. Uwzględniony jest udział społeczeństwa w ochronie środowiska oraz zasady przeprowadzania ocen oddziaływania na środowisko, w tym określenie wpływu przedsięwzięć na jakość powietrza, również w kontekście transgranicznym. Ustawa reguluje udział społeczeństwa w ochronie środowiska i wskazuje organy odpowiedzialne za realizację tych działań [Ustawa 2008];
- Ustawa z dnia 17 lipca 2009 r. o systemie zarządzania emisjami gazów cieplarnianych i innych substancji. Ustawa określa zasady funkcjonowania Krajowego bilansowania i zarządzania emisjami oraz Krajowego systemu bilansowania i prognozowania emisji. Ponadto zostały zawarte informacje dotyczące zarządzaniem emisjami. W ustawie pyły zawieszony ujęte w są w wykazie substancji wprowadzanych do powietrza objętych systemem zarządzania emisjami. Ustawa reguluje także funkcjonowanie Krajowego Systemu Zielonych inwestycji i Rachunku Klimatycznego, a także warunki i zasady realizacji projektów wspólnych wdrożeń [Ustawa 2009].

Akty wykonawcze do ustaw uzupełniają system, poprzez rozporządzenia oraz przepisy prawa miejscowego ustanawiające określone formy ochrony środowiska. Ta zorganizowana struktura stanowi spójny system, gdzie elementy są ze sobą powiązane i tworzą logiczną całość. Wśród aktów wykonawczych znajdują się [Habuda 2015]:

- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 26 stycznia 2010 r. w sprawie wartości odniesienia dla niektórych substancji w powietrzu ustala wartości odniesienia dla określonych substancji w powietrzu, w tym pyłów. Ponadto zostały przedstawione warunki, w jakich ustalane są te wartości, w tym

temperatura i ciśnienie. Określono również okresy, dla których wartości są uśredniane, zasady uznawania wartości za dotrzymane oraz metodyki modelowania poziomów substancji w powietrzu używane w celach referencyjnych [Rozporządzenie 2010a];

- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 2 lipca 2010 r. w sprawie przypadków, w których wprowadzanie gazów lub pyłów do powietrza z instalacji nie wymaga pozwolenia. Zwolnienie dotyczy instalacji wymienionych w załączniku do rozporządzenia oraz tych, które nie są objęte przepisami o standardach emisyjnych. Rozporządzenie określa, że wprowadzanie substancji z instalacji nie wymaga pozwolenia, jeśli emisje z całego Zakładu nie przekraczają 10% dopuszczalnych poziomów substancji lub wartości odniesienia, uśrednionych na 1 godzinę, bez uwzględnienia częstości przekraczania tych poziomów [Rozporządzenie 2010b];
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 2 lipca 2010 r. w sprawie rodzajów instalacji, których eksploatacja wymaga zgłoszenia, dotyczy instalacji o mniejszych parametrach, takich jak małe oczyszczalnie ścieków, instalacje elektroenergetyczne i radiokomunikacyjne, a także urządzenia emitujące pyły oraz gazy bez technicznych środków kontroli. Rozporządzenie ustala, że niektóre instalacje, chociaż nie wymagają pozwolenia na emisję, muszą być zgłoszone do organu ochrony środowiska [Rozporządzenie 2010c];
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 24 sierpnia 2012 r. w sprawie poziomów niektórych substancji w powietrzu dotyczy określenia norm poziomów substancji zanieczyszczających powietrze, w tym pyłów. Ponadto uwzględnione są warunki wykonywania pomiarów [Rozporządzenie 2012];
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 14 czerwca 2019 r. w sprawie programów ochrony powietrza oraz planów działań krótkoterminowych omawia elementy, jakie muszą być zawarte w programach ochrony powietrza oraz planach działań, a także jakie zagadnienia powinny zostać ocenione [Rozporządzenie 2019];
- 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, ustala standardy emisyjne dla różnych rodzajów instalacji, źródeł spalania paliw oraz urządzeń

przeznaczonych do spalania lub współspalania odpadów. Rozporządzenie określa, które instalacje i urządzenia muszą spełniać określone limity emisji pyłów, a także precyzuje metody kontrolowania emisji [Rozporządzenie 2020a];

- Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 11 grudnia 2020 r. w sprawie dokonywania oceny poziomów substancji w powietrzu reguluje metody i standardy oceny jakości powietrza. Określone są wymagania dotyczące jakości pomiarów, lokalizacji oraz ilości punktów pomiarowych, a także rodzaju analizy matematycznej uzyskanych wyników. Rozporządzenie określa również górne i dolne progi oszacowania dla różnych substancji, a także zasady prowadzenia pomiarów składu chemicznego pyłu, co jest kluczowe dla oceny zanieczyszczenia pyłami zawieszonymi [Rozporządzenie 2020b];
- Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 7 września 2021 r. w sprawie wymagań w zakresie prowadzenia pomiarów wielkości emisji precyzuje przypadki, w których obowiązkowe są ciągłe pomiary emisji dla instalacji, źródeł spalania paliw, oraz urządzeń do spalania lub współspalania odpadów [Rozporządzenie 2021];

Wśród unijnych regulacji prawnych regulujących system oceny i zarządzania jakością powietrza znajdują się:

- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2001/81/WE z dnia 23 października 2001 r. w sprawie krajowych poziomów emisji dla niektórych rodzajów zanieczyszczenia powietrza. Celem dokumentu jest ustalenie krajowych limitów emisji zanieczyszczeń powietrza [Dyrektywa 2001];
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2004/107/WE z dnia 15 grudnia 2004 r. w sprawie arsenu, kadmu, rtęci, niklu i wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych w otaczającym powietrzu. Główne cele obejmują ustalenie wartości docelowych dla wskazanych substancji, poprawę jakości powietrza, opracowanie standardów oceny stężeń i depozycji tych zanieczyszczeń oraz zapewnienie publicznego dostępu do informacji o ich poziomach w powietrzu [Dyrektywa 2004];
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/50/WE z dnia 21 maja 2008 r. w sprawie jakości powietrza i czystszej powietrza dla Europy ustanawia

standardy mające na celu ograniczenie zanieczyszczeń powietrza, zapewnia jednolitą ocenę jakości powietrza w Europie i gwarantuje publiczny dostęp do informacji na temat jakości powietrza, wspierając przy tym współpracę międzynarodową [Dyrektywa 2008];

- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego 2010/75/WE z dnia 24 listopada 2010 r. w sprawie emisji przemysłowych (zintegrowane zapobieganie zanieczyszczeniom i ich kontrola) ustala zasady ograniczenia emisji zanieczyszczeń do różnych komponentów środowiska, a także wspieranie gospodarki o obiegu zamkniętym oraz dekarbonizacji. Celem tych działań jest osiągnięcie wysokiego poziomu ochrony zdrowia ludzi i środowiska [Dyrektywa 2010];
- Decyzja wykonawcza Komisji 2011/850/WE z dnia 12 grudnia 2011 r. ustanawiająca zasady stosowania dyrektyw 2004/107/WE i 2008/50/WE Parlamentu Europejskiego i Rady w odniesieniu do systemu wzajemnej wymiany informacji oraz sprawozdań dotyczących jakości otaczającego powietrza. Decyzja określa obowiązki państw członkowskich w zakresie tworzenia raportów dotyczących oceny i zarządzania jakością otaczającego powietrza oraz ustala procedury wzajemnej wymiany danych między państwami członkowskimi na temat sieci monitorowania, stacji i wyników pomiarów jakości powietrza, przeprowadzanych przez stacje specjalnie wybrane do tych celów przez państwa członkowskie [Decyzja 2011].

Wartym wspomnienia jest wydarzenie z 1990 roku, kiedy Departament Energii Stanów Zjednoczonych (*USDOE*) zapoczątkował w Polsce, a szczególnie w Krakowie, program redukcji zanieczyszczeń powietrza wywołanych spalaniem węgla. Podstawą dla tej współpracy była ustawa *SEED (Support for Eastern European Democracy Act)* z 1989 roku, która zobowiązała USA do wsparcia Polski w efektywnym wykorzystaniu paliw kopalnych do ogrzewania budynków oraz do celów przemysłowych. W efekcie realizacji tego programu Kraków stał się centrum innowacyjnych działań na rzecz poprawy jakości powietrza. To było przełomowe wydarzenie zarówno w aspekcie lokalnym, jak i krajowym, mające wpływ na przekształcenie metod zarządzania zanieczyszczeniami powietrza. W ramach tego programu, finansowanego przez *USAID (United States Agency for International Development)*, opracowano m.in. technologie redukcji emisji z pieców i kotłów

domowych, co znacząco wpłynęło na poprawę jakości powietrza w mieście, a także na zapoczątkowanie działań na rzecz ochrony powietrza [Butcher, Pierce 1998].

## **2.7. Monitoring powietrza**

Monitoring ekosystemów, zgodnie z definicją zapoczątkowaną przez Instytutu Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN w 1983 roku, jest to proces zbierania informacji o środowisku, w celu udzielenia odpowiedzi na zadane pytania badawcze. Wykorzystuje on wiele metod powszechnie dostępnych, które umożliwiają przeprowadzenie systematycznych i powtarzalnych badań pomiarowych. Kluczową rolą monitoringu jest identyfikacja ilości i szybkości zmian zachodzących w środowisku przyrodniczym. Monitoring ekosystemów jest długotrwałym i ciągłym gromadzeniem danych dotyczących konkretnych systemów ekologicznych. Wybór liczby systemów do monitorowania powinien być dostosowany do specyfiki obszaru, z uwzględnieniem jego różnorodności przyrodniczej [Leśniak 1995]. Definicja Państwowego Monitoringu Środowiska zawarta jest również w Ustawie z dnia 20 lipca 1991 r. o Państwowej Inspekcji Środowiska, z której wynika, że jest to system pomiarów, ocen i prognoz stanu środowiska. Jego zadaniem jest zbieranie, analiza oraz udostępnianie informacji o stanie środowiska naturalnego w Polsce [Ustawa 1991].

Monitoring powietrza odgrywa istotną rolę w dostarczaniu informacji o stanie środowiska. Jego forma zależy od celów, jakie mają pełnić pomiary stężenia zanieczyszczeń. Wśród nich znajduje się ocena poziomu zanieczyszczeń atmosferycznych oraz identyfikacja tendencji ich zmian. Umożliwia porównanie stężeń zanieczyszczeń z obowiązującymi normami oraz ocenę narażenia ludzi i obiektów na ich wpływ. Ważnym aspektem jest również alarmowanie ludności przed niebezpiecznym stężeniem zanieczyszczeń. Ponadto monitoring powietrza pozwala na zbadanie zmian dyspersji zanieczyszczeń w atmosferze oraz śledzenie ich przemieszczania na duże odległości [Krochmal 1994].

Państwowy Monitoring Środowiska, zatwierdzony przez Ministra Klimatu i Środowiska, jest realizowany przez Inspekcję Ochrony Środowiska, która kontroluje poprawne korzystanie ze środowiska przyrodniczego. Pomiary zanieczyszczenia powietrza prowadzi Główny Inspektorat Ochrony Środowiska

przy użyciu zaawansowanego sprzętu. Monitoring jest zgodny z krajowymi oraz międzynarodowymi przepisami prawa. Wykorzystuje najlepsze metody pomiarowe, co umożliwia uzyskanie aktualnych danych i szybszą reakcję na zagrożenie środowiska oraz ludzi. Dane pomiarowe są istotne dla administracji, naukowców i społeczeństwa, na podstawie czego możliwe jest podejmowanie działań prewencyjnych oraz zaradczych. To umożliwia realizację zadań z zakresu modelowania i prognozowania dyspersji zanieczyszczeń w Instytucie Ochrony Środowiska – Państwowy Instytut Badawczy. Sieć monitoringu powietrza funkcjonuje na trzech szczeblach: krajowym, regionalnym oraz lokalnym, i obejmuje wszystkie województwa. Stała liczba stanowisk pomiarowych dostosowana jest do liczby mieszkańców, rodzaju i źródeł emisji, oraz przekraczania dopuszczalnych stężeń. Stacje pomiarowe są lokalizowane zgodnie z ich przeznaczeniem oraz obszarem reprezentatywności uzyskanych wyników pod względem rodzaju danej stacji. Wyróżnia się stacje pomiarowe: tła miejskiego, podmiejskiego, komunikacyjne, przemysłowe, pozamiejskie oraz tła regionalnego [Kaczmarczyk 2017; Kleczkowski 2020; Sobczyk 2014].

Wybór lokalizacji punktów pomiarowych wiąże się z wieloetapowym planowaniem oraz spełnieniem rygorystycznych kryteriów opisanych w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 13 września 2012 r. w sprawie dokonywania oceny poziomów substancji w powietrzu. Rozporządzenie określa kryteria lokalizacji w skali mikro oraz makro. W pierwszej, w przypadku pyłów zawieszonych PM<sub>2,5</sub> i PM<sub>10</sub>, zwraca się szczególną uwagę, aby przepływ powietrza w obrębie kilku metrów wokół czerpni nie był zakłócony innymi przeszkodami w postaci krzewów, drzew oraz obiektów budowlanych, a w przypadku stacji komunikacyjnych w odległości co najmniej 0,5 m od zabudowań oraz 25 m od krańca głównych skrzyżowań. Istotna jest również wysokość czerpni w przedziale 1,5-4 m powyżej poziomu gruntu, a także jej budowa, aby zapobiegać ponownemu zasysaniu odprowadzanego powietrza. W drugiej skali lokalizacja powinna być dobierana pod względem obszarów o najwyższych poziomach substancji, na które ludność będzie narażona w okresie uśredniania wyników, a także dla tych obszarów, na których określono poziomy dopuszczalne, docelowe i poziomy celów długoterminowych substancji w powietrzu. Roczny poziom dopuszczalny pyłu zawieszzonego PM<sub>2,5</sub> ze względu na ochronę zdrowia ludzi od 2020 r. wynosi 20 µg/m<sup>3</sup>. Zawartość metali oznacza się wyłącznie w pyłe zawieszonym PM<sub>10</sub>. Dla ołowiu poziom dopuszczalny w powietrzu w roku kalendarzowym wynosi 0,5

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ . W przypadku pozostałych substancji poziomy docelowe od 2013 r. w roku kalendarzowym wynoszą dla: arsenu  $6 \text{ ng}/\text{m}^3$ ; kadmu  $5 \text{ ng}/\text{m}^3$ ; niklu  $20 \text{ ng}/\text{m}^3$ . Ponadto wyniki muszą być reprezentatywne dla obszaru o danej powierzchni względem oddziaływania transportu lub przemysłu. W przypadku oddziaływania przemysłu lokalizacja przynajmniej jednego punktu pomiarowego powinna znajdować się po stronie zawietrznej instalacji w rejonie pobliskiego terenu mieszkalnego. W ramach monitoringu bada się stężenie wielu zanieczyszczeń powietrza, takich jak: pyły zawieszone PM<sub>2,5</sub> i PM<sub>10</sub>, benzen, dwutlenek siarki, tlenki azotu, tlenek węgla, ozon, benzo(a)piren oraz metale ciężkie. Minimalna liczba stałych stanowisk pomiarowych do pomiarów została przedstawiona w tabeli 4. Liczba tych punktów zależy od liczby mieszkańców. Im większa liczba mieszkańców, tym wymagana jest większa liczba stałych punktów pomiarowych, do nawet 15 punktów w przypadku pyłów zawieszonych [Rozporządzenie 2012; Sobczyk 2014].

**Tabela 4.** Minimalna liczba stałych stanowisk pomiarowych wymagana na potrzeby oceny jakości powietrza

Liczba mieszkańców strefy (w tysiącach)	Minimalna liczba stałych punktów pomiarowych							
	Poziom substancji w powietrzu przekracza górny próg oszacowania				Poziom substancji w powietrzu znajduje się między górnym a dolnym progiem oszacowania			
	benzen, dwutlenek azotu, tlenki azotu, dwutlenek siarki, ołów, tlenek węgla	pył zawieszony PM <sub>2,5</sub> i PM <sub>10</sub>	arsen, kadm, nikiel	Benzo(a)piren	benzen, dwutlenek azotu, tlenki azotu, dwutlenek siarki, ołów, tlenek węgla	pył zawieszony PM <sub>2,5</sub> i PM <sub>10</sub>	arsen, kadm, nikiel	Benzo(a)piren
0 - 249	1	2	1	1	1	1	1	1
250 - 499	2	3	1	1	1	2	1	1
500 - 749	2	3	1	1	1	2	1	1
750 - 999	3	4	2	2	1	2	1	1
1000 - 1499	4	6	2	2	2	3	1	1
1500 - 1999	5	7	2	2	2	3	1	1
2000-2749	6	8	2	3	3	4	1	1
2750 - 3749	7	10	2	3	3	4	1	1
3750 - 3749	8	11	3	4	3	6	2	2
4750 - 5999	9	13	4	5	4	6	2	2
> 6000	10	15	5	5	4	7	2	2

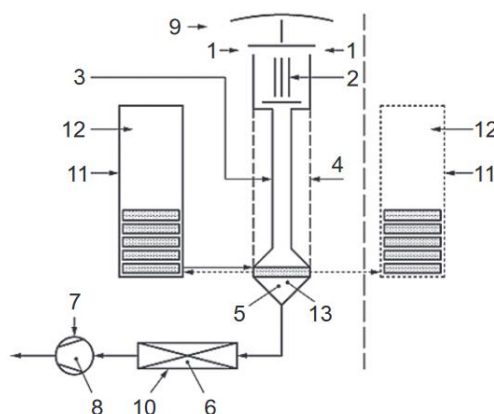
Źródło: [Rozporządzenie 2012]

## **2.8. Metody analizy ilościowej i jakościowej pyłu zawieszonego**

Do pomiarów pyłów zawieszonych, wykonywanych przez akredytowane laboratorium Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska, przepisy zalecają stosowanie dwóch metod: grawimetryczną i automatyczną. Metoda grawimetryczna, inaczej referencyjna, jest najdokładniejszą metodą, będącą punktem odniesienia dla weryfikacji pomiarów. Metoda automatyczna jest równoważna do referencyjnej z zastosowaniem mierników automatycznych. Dla mierników automatycznych konieczne jest wyznaczenie współczynników korekcyjnych do metod referencyjnych. Dalszym etapem są analizy jakościowe pyłu przy użyciu różnych technik analitycznych w celu określenia składu pyłu [Główny Inspektorat 2020; Malec, Borowski 2016]. Ocena równoważności jest zawarta w Dyrektywie 2008/50/WE w sprawie jakości powietrza i czystszej powietrza dla Europy. Proces ten zakłada, że państwo członkowskie może stosować alternatywne metody pomiaru, jeśli potwierdzi, że wyniki uzyskiwane tymi metodami są równoważne z wynikami metod referencyjnych. Wyniki te muszą zostać skorygowane, aby zapewnić ich pełną porównywalność z wynikami metod referencyjnych. W tym celu prowadzi się badania biegłości oraz badania porównawcze. Komisja Europejska ma prawo zażądać przedstawienia sprawozdania potwierdzającego równoważność tych metod, które następnie oceniane są zgodnie z wytycznymi Komisji [Dyrektywa 2008]. Zgodnie z przepisami pomiary zanieczyszczenia powietrza muszą stanowić 90% ważnych wyników w ciągu roku. Niepewność pomiarowa nie może przekraczać 25%. Wymóg nie obejmuje utraty danych wskutek okresowego sprawdzenia, konserwacji i kalibracji. Z technicznego i merytorycznego punktu widzenia istotną rolę odgrywa weryfikacja danych pomiarowych pyłów zawieszonych pod kątem poprawności działania urządzeń, prędkości przepływu powietrza w poborniku oraz czystości próbek. Dane są weryfikowane na czterech poziomach: bieżąco (od poniedziałku do piątku oraz w weekendy w przypadku wysokiego stężenia zanieczyszczeń), okresowo (na koniec każdego miesiąca), rocznie (po zakończeniu roku) oraz na poziomie krajowym (weryfikacja przez pracowników WIOŚ). Każdy z tych etapów może prowadzić do korekty wyników, co ma zapewnić najwyższą jakość i spójność danych [[www.powietrze.gios.gov.pl/bank\\_danych](http://www.powietrze.gios.gov.pl/bank_danych)].

## Metoda pomiarowa grawimetryczna

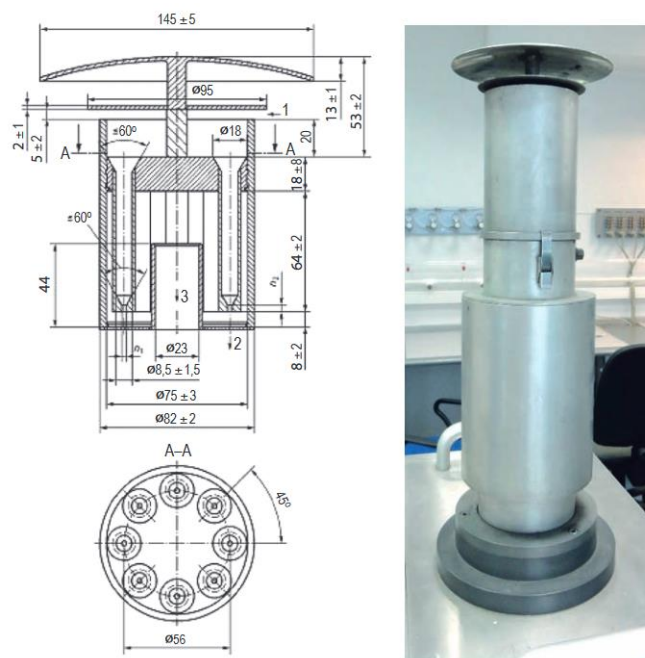
Pomiary pyłów zawieszonych wykonuje się przy pomocy poborników powietrza, wyposażonych w chłodnicę Poltiera i sterowanych mikroprocesorem. System służy do automatycznego wychwytywania cząstek pyłów na filtrach, z podziałem na pyły zawieszone PM<sub>2,5</sub> i PM<sub>10</sub>. Wewnętrzna pompa umożliwia przepływ do 2,3 m<sup>3</sup>/h. W standardowym poborniku (rysunek 9) powietrze jest zasysane z otoczenia (1). W głowicy poboru powietrza wykonywane są również pomiary temperatury i ciśnienia powietrza. Następnie powietrze przepływa przez wlot impaktora (2), z funkcją selekcji większych cząstek, przechodzi przez połączenia rurowe (4), chronione osłoną. W kolejnym etapie powietrze wędruje przez filtr kwarcowy o średnicy 47 mm, który wychwytuje cząstki (5). W tym samym czasie przepływomierz (6) dokonuje pomiarów powietrza przez system, a zamontowana pompa (7) utrzymuje stały przepływ zasysanego powietrza. W celu zapewnienia monitorowania i kontroli powietrza zamontowany jest system kontroli przepływu (8). W późniejszym etapie ponownie jest wykonywany pomiar temperatury i ciśnienia powietrza (9), a przy tym dokładny pomiar warunków atmosferycznych (10). Co 24 godziny zmieniacz próbek automatycznie zmienia kolejne filtry i umieszcza w magazynku do ich przechowywania (11). W magazynku również odbywa się pomiar temperatury (12). Pobornik mierzy końcową temperaturę powietrza przy filtrze, zapewniając dokładność pomiarową (13) [Frączkowski 2017; Juda-Rezler, Toczko (red.) 2016].



**Rys. 9.** Schemat standardowego pobornika  
Źródło: [Frączkowski 2017]

Zdecydowanie najważniejszym elementem pobornika jest głowica separująca, którą przedstawiono na rysunku 10 wraz z wymiarami oraz

przekrojem. Zapewnia ona dokładny pomiar określonej frakcji pyłu, a także zapobiega wpływom większych zanieczyszczeń na wyniki pomiarów. Głowica odznacza się wytrzymałą budową na różne warunki atmosferyczne [Frączkowski 2017; Ministerstwo Środowiska 2003].



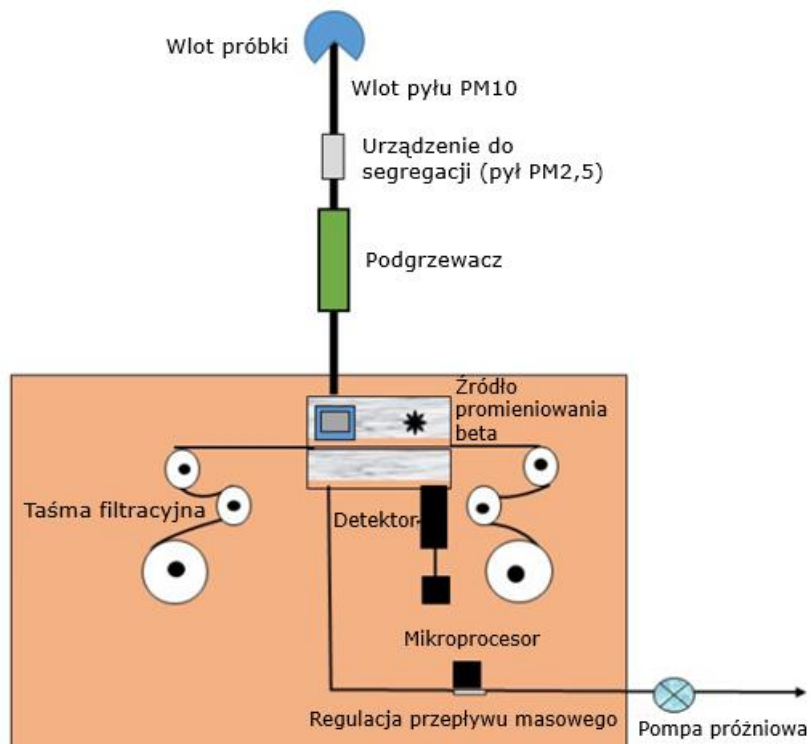
**Rys. 10.** Schemat głowicy poboru pyłów dla przepływu 2,3 m<sup>3</sup>/h  
Źródło: [Frączkowski 2017]

Pierwszym etapem metody grawimetrycznej jest precyzyjny pobór pyłu zawieszonego przy użyciu odpowiednich poborników powietrza, natomiast kolejnym jest kondycjonowanie i ważenie filtrów w pokoju wagowym oraz prezentacja wyników [Juda-Rezler, Toczko (red.) 2016]. Procedurę ważenia filtrów opisano w części doświadczalnej (rozdział III).

### **Metoda pomiarowa automatyczna**

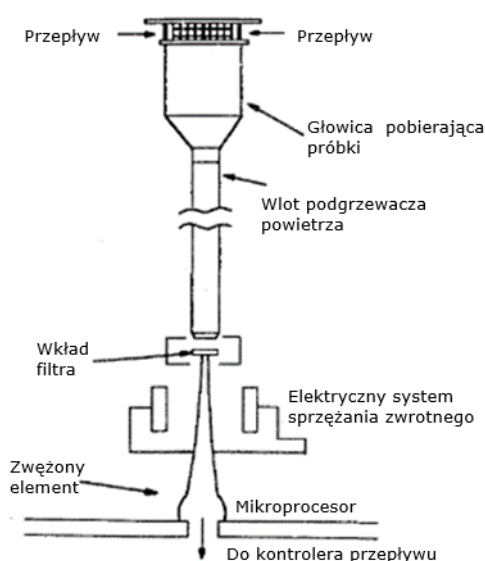
Ze względu na różnorodne potrzeby monitorowania jakości powietrza ważne jest wykonywanie pomiarów stężenia pyłów zawieszonych uśrednionych, w krótszych okresach (jedna godzina), a także zapewnienie natychmiastowego dostępu do tych danych. Do oceny jakości stosowane są certyfikowane mierniki automatyczne pyłów zawieszonych, które umożliwiają bieżący pomiar stężeń pyłu i prezentację wyników. Dane są aktualizowane, a następnie przeliczane na średnie dobowe i porównywane z poziomami dopuszczalnym [Gębicki i in. 2012; Główny Inspektorat 2024]. Wśród typów mierników automatycznych pyłów zawieszonych wyróżnia się:

- Mierniki typu *BAM* (*Beta-Attenuation Monitors*) – wykorzystujące osłabienie promieniowania beta. Na rysunku 11 przedstawiono schemat działania miernika *Met One Bam-1020*. W skład miernika wchodzi: wlot próbkowania, gdzie powietrze jest zasysane z otoczenia; urządzenie do segregacji pyłów z podziałem na różne frakcje; podgrzewacz utrzymujący wilgotność względną poniżej 35%; źródło promieniowania; wymienna taśma filtracyjna, na której osadzają się cząstki pyłu; detektor, który rejestruje ilość osadzonego pyłu po przejściu przez taśmę; mikroprocesor odpowiedzialny za przetwarzanie danych; regulator przepływu masy, zapewniający stałe warunki próbkowania, oraz pompa próżniowa, która utrzymuje przepływ powietrza przez układ. Kiedy cząstki beta przechodzą przez taśmę z osadzonym pyłem, ich h promieniowanie jest osłabiane w zależności od ilości zgromadzonego pyłu. Wraz ze wzrostem ilości pyłu zmniejsza się liczba pomiarów cząstek beta. Dobór źródła promieniowania beta zależy od zakresu energii emitowanego przez to źródło. O dokładności pomiaru decyduje dostosowanie zakresu energii widma do grubości próbki. Obecnie do tego typu pomiarów stosuje się źródło węglowe  $^{14}\text{C}$  [Shukla, Aggarwal 2022];



**Rys. 11.** Schemat miernika *Met One Bam-1020*  
 Źródło: [Shukla, Aggarwal 2022]

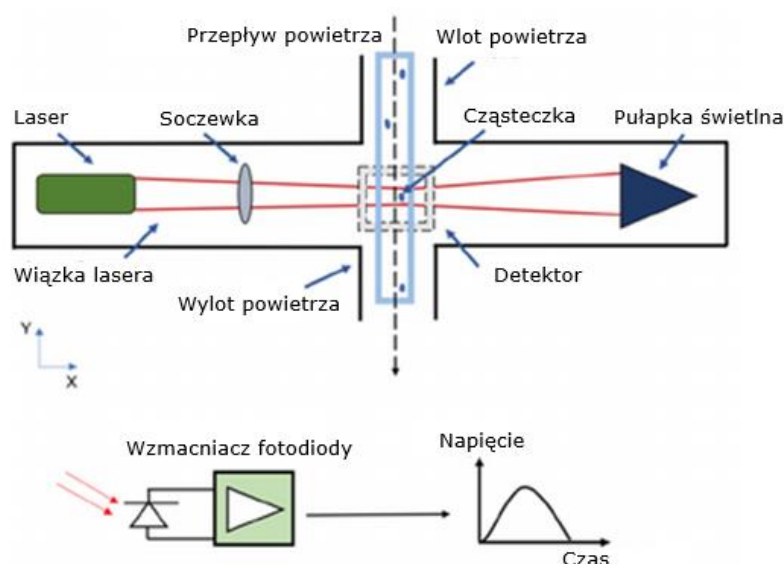
- Mierniki typu *TOEM* (*Tapered Element Oscillating Microbalance*) – pomiar zmiany częstotliwości drgań stożkowego elementu, na którym gromadzi się pył zawieszony w powietrzu. Im więcej pyłu osadza się na tym elemencie, tym bardziej zmienia się jego częstotliwość drgań. Schemat budowy miernika *TOEM* przedstawiono na rysunku 12. Miernik składa się z dwóch głównych części: jednostki czujnikowej i jednostki kontrolnej. Jednostka czujnikowa obejmuje głowicę próbkującą, podgrzewany wlot powietrza, filtr oraz zwężony element. Jednostka kontrolna natomiast zajmuje się przetwarzaniem danych, wyświetlaniem wyników oraz kontrolą przepływu powietrza, co gwarantuje dokładność pomiarów w czasie rzeczywistym. Zanieczyszczone powietrze płynie przez podgrzewany wlot i dociera do filtra, gdzie cząstki pyłu są zatrzymywane. Zwężony element oscyluje z określoną częstotliwością, która zmienia się proporcjonalnie do masy osadzonego pyłu. Zmiany częstotliwości są rejestrowane i analizowane przez mikroprocesor w jednostce kontrolnej, która przelicza stężenie pyłu w powietrzu [Li i in. 2012; Patashnick, Rupprecht 1991];



**Rys. 12.** Schemat miernika *TOEM*  
 Źródło: [Patashnick, Rupprecht 1991]

- Mierniki typu *OPC* (*Optical Particle Counters*) – w porównaniu z poprzednimi miernikami nie wymagają częstych konserwacji, są proste w obsłudze i mogą działać bez nadzoru przez dłuższy okres. Mierniki typu *OPC* wykorzystują zasadę rozpraszania światła do wykrywania i pomiaru stężenia cząstek w powietrzu. Zbudowane są z ciemnej komory ze źródłem światła laserowego, soczewki, detektora oraz pochłaniacza światła. Kiedy próbka powietrza

przechodzi przez komorę, każda napotkana cząstka rozprasza światło w różnych kierunkach. Detektor, który jest zlokalizowany prostopadle do wiązki światła, mierzy intensywność rozproszonego światła, co pozwala na określenie rozmiaru cząstki. Schemat miernika przedstawiono na rysunku 13. Przykładem są modele firmy GRIMM [Burkart i in. 2010; Molaie, Lino 2021].



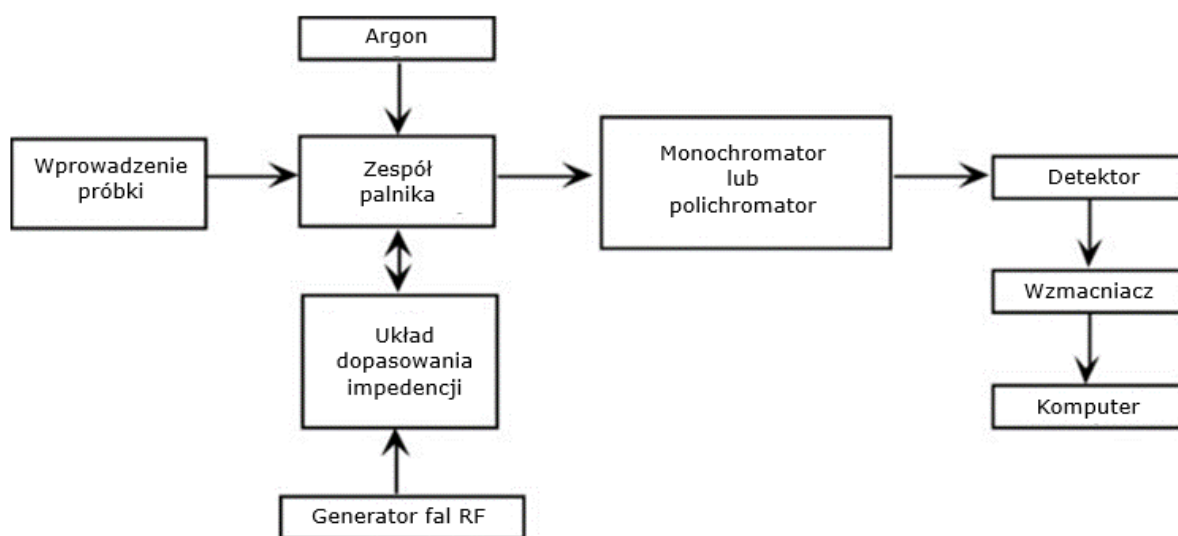
**Rys. 13.** Schemat miernika typu OPC  
Źródło: [Molaie, Lino 2021]

## Metody analityczne spektroskopowe

W identyfikacji składu chemicznego stosuje się metody spektroskopowe, wykorzystujące oddziaływanie promieniowania elektromagnetycznego lub korpuskularnego. W wyniku zjawiska absorpcji oraz emisji energii przez analizowaną próbkę uzyskuje się charakterystyczne widma spektralne, na podstawie których można określić ilość poszczególnych składników w próbce [Cygański 2017].

Do analitycznych metod spektroskopowych należą: spektroskopia cząsteczkowa, spektroskopia atomowa oraz spektroskopia jądrowa. Kryterium ich stosowania jest rodzaj układu materialnego. W przypadku spektroskopii emisyjnych oraz absorpcyjnych kryterium determinuje forma wymiany energii. W przypadku próbek środowiskowych, w tym pyłów zawieszonych, możliwe jest użycie emisyjnej spektroskopii atomowej - ICP-AES (*Inductively Coupled Plasma - Atomic Emission Spectroscopy*) [Stepnowski i in. 2010].

Schemat działania aparatu *ICP-AES* przedstawiono na rysunku 14. Podczas analizy próbka w postaci roztworu jest wprowadzana jako aerozol do zespołu palnika, który jest zasilany gazem argonowym. Palnik zbudowany jest z trzech współosiowych kwarcowych rur, przez które przepływa argon. Układ sieci dopasowania impedancji połączony jest z generatorem fal *RF* (częstotliwość radiowa), co umożliwia podtrzymanie i stabilność plazmy. Próbka zostaje wprowadzona do plazmy o temperaturze dochodzącej do 10000°C, co wzbudza atomy obecne w próbce. Emitowane promieniowanie elektromagnetyczne przechodzi przez monochromator lub polichromator, który rozdziela je na odpowiednie długości fal. Następnie detektor rejestruje intensywność promieniowania. Analiza danych wzmacnianych przez komputer umożliwia wyznaczenie zawartości pierwiastków w próbce. Warto podkreślić, że w ramach jednej analizy istnieje możliwość jednoczesnego oznaczenia różnych pierwiastków [Burns, Finch 1999].



**Rys. 14.** Schemat działania aparatu *ICP-AES*  
Źródło: [Burns, Finch 1999]

Opisane metody pomiarowe i analityczne pozwalają na uzyskanie dokładnych pomiarów jakości powietrza. Automatyczne metody dostarczają ciągłych danych, które mogą być natychmiast wykorzystywane do informowania i ostrzegania społeczeństwa, ale również do podejmowania działań naprawczych. Metody grawimetryczne zapewniają wysokiej jakości pomiary dla analizy stanu zanieczyszczeń oraz są elementem weryfikacji danych dla metod automatycznych, natomiast techniki analityczne, takie jak emisyjna spektroskopia atomowa,

umożliwiają poznanie składu chemicznego zanieczyszczeń. Precyzyjna ocena jakości powietrza umożliwia podejmowanie skutecznych działań prewencyjnych i naprawczych w zakresie ochrony środowiska.

## **Rozdział III. Część badawczo-obliczeniowa**

W rozdziale przedstawiono opis metod pomiarowych oraz charakterystykę aglomeracji krakowskiej, stanowiącą podstawę badań nad zanieczyszczeniami pyłowymi PM<sub>2,5</sub>. Składa się on z opisu automatycznej metody pomiarowej pyłów PM<sub>2,5</sub>, metody grawimetrycznej z wykorzystaniem pobornika oraz metody wagowej, w której zważono filtry przed ekspozycją na zanieczyszczenia i po niej. Opisano również laboratoryjną analizę próbek pyłów z użyciem spektrometru emisyjnego atomowego z plazmą argonową wzbudzaną indukcyjnie (*ICP-AES*), do oznaczenia zawartości metali ciężkich (Pb, Cd, As i Ni). Ponadto rozdział zawiera lokalizację aglomeracji krakowskiej, jej strukturę demograficzną, zagrożenia ekologiczne, informacje o zakładach przemysłowych, warunkach klimatycznych oraz zanieczyszczeniach pyłowych na podstawie danych Europejskiej Agencji Środowiska. Opisano także punktowe źródła zanieczyszczeń, które są podstawą do wyznaczenia punktów pomiarowych, w tym ArcelorMittal, Elektrociepłownię Kraków, Ekospalarnię Kraków oraz Port Lotniczy Kraków-Balice. Na koniec przedstawiono dane meteorologiczne z okresu prowadzenia badań w 2021 roku i 2022 roku oraz wyniki dotyczące stężeń pyłów zawieszonych PM<sub>2,5</sub> i zawartości metali ciężkich w próbkach pyłów. Ponadto przeprowadzono dokładną analizę statystyczną pomiarów metody grawimetrycznej ze zmiennymi mikroklimatycznymi w celu zbadania zależności pomiędzy tymi czynnikami a koncentracją zanieczyszczeń.

### **3.1. Przedmiot i metodyka badań**

Przedmiotem badań jest pył zawieszony o średnicy aerodynamicznej mniejszej niż 2,5 mikrometra (PM<sub>2,5</sub>). Pomiary przeprowadzono w 2021 i 2022 roku. Dokonano analizy składu chemicznego pobranego pyłu, ze szczególnym uwzględnieniem metali ciężkich. Analiza pozwoli na opracowanie skutecznych strategii prewencyjnych i zaradczych w celu poprawy jakości powietrza.

W badaniach wykorzystano metody pomiarowe (automatyczne i grawimetryczne) oraz metody analityczne.

## Metoda pomiarowa automatyczna

Przeprowadzono pomiary terenowe stężenia pyłów zawieszonych PM<sub>2,5</sub> z użyciem pyłomierza model WP6130 (rysunek 15). Detekcja pyłów odbywa się przy pomocy metody optycznej, w której pyły wykrywane są za pomocą światła laserowego. Czujnik optyczny dokonuje pomiaru stężenia pyłów, które zostały zassane przy pomocy pompy ssącej. Im większe zanieczyszczenie, tym większa intensywność rozproszonego światła. Producent urządzenia deklaruje detekcję pyłów PM<sub>2,5</sub> w przedziale 0-999 µg/m<sup>3</sup>, przy błędzie pomiarowym wynoszącym 10%. Na tej podstawie wyliczono niepewność standardową pomiaru (*u*) typu B (wzór 8), przy założeniu normalnego rozkładu prawdopodobieństwa, wyrażoną jako odchylenie standardowe [Ziopaja 2016]. Ostatecznie niepewność pomiaru miernika wynosi ±5,774%. Kampania pomiarowa odbywała się celowo w okresie wiosennym, aby zminimalizować wpływ niskiej emisji zanieczyszczeń z energetycznego spalania paliw. Wykonano pomiar emisji zanieczyszczeń w pobliżu Portu Lotniczego. Uwzględniono zmiany stężeń zanieczyszczeń pyłowych w zależności od warunków pogodowych. Proces gromadzenia danych trwał od 17 marca 2021 r. do 20 kwietnia 2021 r. Wykonano 35 pomiarów. Jeden pomiar trwał 60 minut (od 12.00 do 13.00). Wybór godziny był uwarunkowany dostępnością wolnego czasu, w którym mogły być wykonywane pomiary z perspektywy systematycznego zbierania danych. Pomiar stężenia pyłów odbywał się w czasie rzeczywistym za pomocą opisanego urządzenia, zgodnie z instrukcją producenta. Odczytów dokonywano bezpośrednio z panelu wyświetlacza urządzenia po ustabilizowaniu wyniku, po upływie około 30 sekund od jego uruchomienia. Ten krótki okres stabilizacji gwarantował, że otrzymane wyniki były nie tylko precyzyjne, ale także reprezentatywne dla aktualnych warunków atmosferycznych w danym miejscu pomiarowym.

$$u = \frac{\Delta_{gr}(x)}{\sqrt{3}} = \frac{10\%}{\sqrt{3}} \approx 5,774\% \quad (8)$$

Gdzie:  $\Delta_{gr}(x)$  – maksymalna wartość błędu wskazania urządzenia pomiarowego [%].



**Rys. 15.** Pyłomierz automatyczny, model WP6130  
Źródło: własne

### **Metoda pomiarowa grawimetryczna (manualna)**

Przeprowadzono pomiary stacjonarne stężenia pyłów zawieszonych PM<sub>2,5</sub> metodą referencyjną (manualną). Proces poboru pyłu trwał od 1 sierpnia 2022 r. do 2 października 2022 r., w wyniku czego uzyskano 63 filtry, z których każdy był eksponowany przez okres 24-godzin. Podczas badań uzyskano wyniki z dziewięciu pełnych tygodni, co pozwoliło na dalszą analizę. Do pomiarów został użyty niskoprzepływowy pobornik, model *MicroPNS*, typ *LVS16/17*, przedstawiony na rysunku 16. W czasie wykonywania pomiarów 24-godzinna objętość zassanego powietrza wyniosła 54,9 m<sup>3</sup>, co daje 2,29 m<sup>3</sup>/h. Do pomiarów została dobrana głowica separująca do pomiaru pyłów PM<sub>2,5</sub>. Pobór pyłu odbywał się zgodnie z normą PN-EN 12341:2014. W celu zapewnienia sterylnych warunków i zapobiegania utraty pyłu lub zanieczyszczenia filtrów kasety z próbkami transportowano w szczelnych pojemnikach, w pozycji pionowej. Wybór okresu letniego oraz wczesnojesiennego miał na celu minimalizację wpływu niskiej emisji zanieczyszczeń pochodzących ze spalania paliw stałych do ogrzania budynków. Skupiono się na ocenie ekspozycji emisji w pobliżu wybranych źródeł punktowych (duże emitory pyłów), takich jak: ArcelorMittal Poland Oddział w Krakowie, Elektrociepłownia Kraków oraz Ekospalarnia Kraków. To umożliwiło zarejestrowanie zmian emisji pyłów w analizowanym okresie.



**Rys. 16.** Pobornik powietrza, model *MicroPNS*, typ *LVS16/17*  
Źródło: własne

### **Metoda wagowa**

W celu określenia stężenia pyłu zawieszonego PM<sub>2,5</sub> konieczne było zważenie filtrów przed ekspozycją i po niej, zgodnie z normą PN-EN 12341:2014, z wykorzystaniem robotycznego systemu pomiarowego RB 2.4Y.F, przedstawionego na rysunku 17. Na rysunku 18 przedstawiono filtry po ekspozycji o różnym poziomie zanieczyszczenia. Istotnym elementem metody wagowej jest zapewnienie odpowiednich warunków w pokoju wagowym, takich jak: temperatura powietrza w zakresie 19-21°C, wilgotność 45-50%, niepewność czujnika temperatury mniejsza lub równa 0,2°C, niepewność czujnika wilgotności mniejsza lub równa 2%, rozdzielczość wagi mniejsza lub równa 10 µg oraz niepewność kalibracji wagi maksymalnie 25 µg dla zakresu od 0 mg do 200 mg. Warto zaznaczyć, że konieczny był ciągły monitoring warunków panujących w pokoju wagowym, aby zapewnić precyzyjność pomiarów [Juda-Rezler, Toczko (red.) 2016]. W metodzie zastosowano filtry kwarcowe o średnicy 47 mm firmy *Whatman*. Filtry przed ekspozycją zostały odpowiednio oznaczone oraz poddane procesowi kondycjonowania w pokoju wagowym przez 48 godzin. Po tym czasie zostało wykonane pierwsze ważenie filtrów przy pomocy systemu pomiarowego bez ingerencji operatora. Następnie filtry zostały poddane kolejnemu kondycjonowaniu przez okres 12 godzin i drugi raz zważone. Uzyskana różnica pomiędzy dwoma ważeniami nie mogła być większa niż 40 µg według wzoru (9) [Juda-Rezler, Toczko (red.) 2016; Frączkowski 2017; Instytut Podstaw...2021]

$$m_u = m_1 - m_2 \leq 40 \quad (9)$$

Gdzie:  $m_u$  – masa czystego filtra,  $\mu\text{g}$ ;  $m_1$  – masa filtra dla pierwszego ważenia,  $\mu\text{g}$ ;  $m_2$  – masa filtra dla drugiego ważenia,  $\mu\text{g}$ .

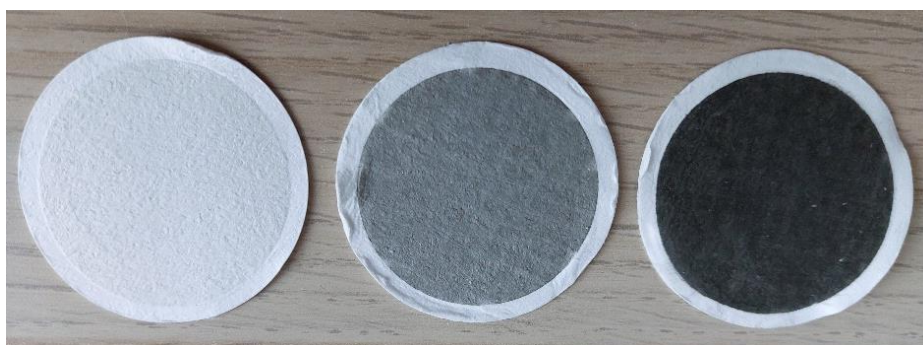
Filtry niespełniające tych wymogów są trzeci raz kondycjonowane i kolejny raz ważone, przy różnicy pomiędzy drugim a trzecim ważeniem nie większej niż  $40 \mu\text{g}$  [Frączkowski 2017; Juda-Rezler, Toczko (red.) 2016]. Pozostałe filtry zostały odrzucone. W metodzie zostały również uwzględnione filtry ślepe terenowe, które zostały zważone w analogiczny sposób, natomiast nie były poddane ekspozycji. Po ekspozycji filtrów i dostarczeniu do pokoju wagowego, umieszczono je w magazynie systemu robotycznego i kondycjonowano w warunkach pokoju wagowego przez okres 48 godzin i po tym zważono. Następnie filtry były poddawane kondycjonowaniu przez do 72 godzin i drugi raz zważono, a różnica między pierwszym a drugim ważeniem nie mogła być większa niż  $60 \mu\text{g}$ . Uzyskana średnia z dwóch ważeń pozwoliła uzyskać masę filtrów wyeksponowanych. Stężenie pyłu zawieszonego zostało obliczone według wzoru 10 dla jednogodzinnego przepływu równego  $2,29 \text{ m}^3/\text{h}$  [Frączkowski 2017; Instytut Podstaw...2021; Juda-Rezler, Toczko (red.) 2016].

$$c = \frac{m_l - m_u}{\varphi_a * t} \quad (10)$$

Gdzie:  $c$  – stężenie zanieczyszczeń,  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ;  $m_l$  – masa filtra po ekspozycji,  $\mu\text{g}$ ;  $m_u$  – masa czystego filtra,  $\mu\text{g}$ ;  $\varphi_a$  – przepływ w warunkach rzeczywistych,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $t$  – czas poboru, h.



**Rys. 17.** Robotyczny system pomiarowy *RB 2.4Y.F* do ważenia filtrów  
Źródło: własne



**Rys. 18.** Filtry o różnym poziomie zanieczyszczenia, poddane ekspozycji pyłu zawieszonego  $PM_{2,5}$   
Źródło: własne

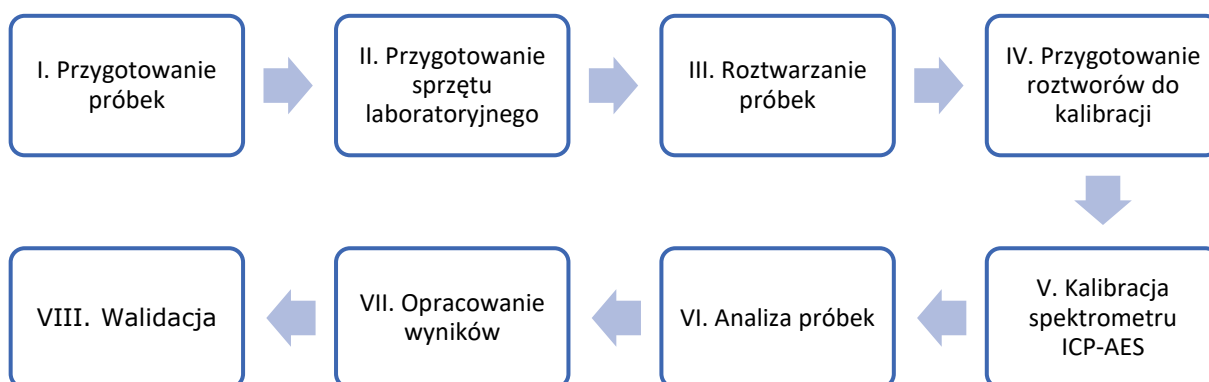
### **Metoda laboratoryjna**

Z filtrami po ekspozycji postępowano zgodnie z normą PN-EN 14902:2010, Jakość powietrza atmosferycznego – Standardowa metoda oznaczania Pb, Cd, As i Ni we frakcji  $PM_{10}$  pyłu zawieszonego. Analizę wykonano dla 9 tygodni (każdy tydzień oddzielnie w okresie od 1 sierpnia 2022 r. do 2 października 2022 r.) oraz dla jednego filtra ślepego. Do analizy wykorzystano spektrometr emisyjny atomowy z plazmą argonową wzbudzaną indukcyjnie – *ICP AES 4200* firmy *Agilent* przedstawiony na rysunku 19.



**Rys. 19.** Spektrometr emisyjny atomowy z plazmą argonową wzbudzaną indukcyjnie –  
*ICP AES 4200*  
 Źródło: własne

Procedura analizy filtrów PM<sub>2,5</sub> składała się z etapów przedstawionych na rysunku 20:



**Rys. 20.** Procedura analizy filtrów PM<sub>2,5</sub>  
 Źródło: opracowanie na podstawie [Norma PN-EN 14902:2010]

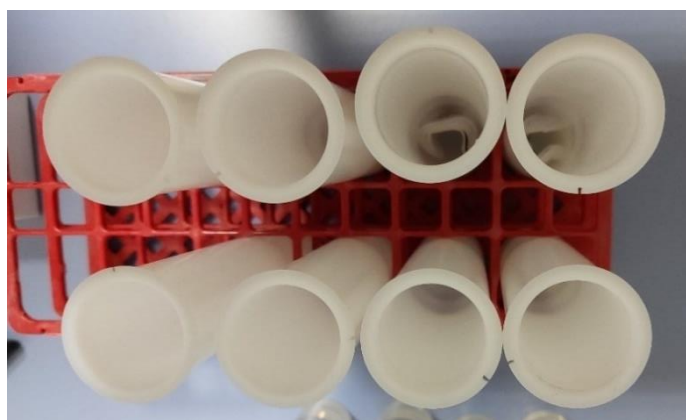
- I. **Przygotowanie próbek.** Pierwszym etapem było posegregowanie zważonych filtrów tygodniami (po 7 sztuk) oraz pocięcie ich wykrojnikiem na połówki. Pierwszą połówkę filtrów przeznaczono do analiz, natomiast drugą pozostawiono na wypadek konieczności powtórzenia analiz [Instytut Podstaw 2021; Norma PN-EN 14902:2010].
- II. **Przygotowanie sprzętu laboratoryjnego.** Przed wykonaniem analizy wymoczono naczynia do mineralizatora przy użyciu kwasu azotowego (V) i nadtlenu wodoru, po czym naczynia dokładnie przepłukano wodą dejonizowaną. Wszystkie pozostałe naczynia laboratoryjne (zlewki, bagietki,

kolby pomiarowe) wymoczono przez kilka godzin w kwasie azotowym (V), a następnie kilkakrotnie przepłukano tym kwasem. Końcowym etapem było przepłukanie naczyń wodą dejonizowaną, osuszenie oraz przechowywanie ich w szczelnym pojemniku do czasu analizy. Podjęte działania miały na celu zminimalizowanie tła pomiarowego związanego z obecnością zanieczyszczeń na naczyniach, co mogłoby doprowadzić do obniżenia czułości i dokładności metody analitycznej. Zastosowane roztwory przedstawiono na rysunku 21 [Norma PN-EN 14902:2010].



**Rys. 21.** Zastosowane roztwory: nadtlenek wodoru 30%, kwas azotowy (V) 65%  
Źródło: własne

III. **Roztwarzanie próbek.** W etapie zastosowano metodę rozkładu próbek na mokro w układzie zamkniętym. W tym celu na jedną serię filtrów (7 poówek filtrów) znajdujących się w naczyniu o pojemności 50 ml wykorzystano: 8 ml 65-procentowego kwasu azotowego (V) oraz 2 ml 30-procentowego nadtlenu wodoru. Zalane roztworami złożone i dociśnięte filtry w naczyniach przedstawiono na rysunku 22 [Kozak 2012; Norma PN-EN 14902:2010].



**Rys. 22.** Roztwór z filtrami w naczyniach  
Źródło: własne

Następnie zamknięte szczelnie naczynia umieszczono na płycie obrotowej mineralizatora mikrofalowego *Multiwave 3000* i przeprowadzono proces mineralizacji na podstawie schematu przedstawionego w tabeli 5. Schemat procesu mineralizacji składa się z trzech etapów:

1. ogrzewanie trwające 20 minut, temperatura próbki wzrasta od temperatury pokojowej do 180°C przy mocy 1000 W;
2. zwiększenie temperatury do 220°C i utrzymanie na tym poziomie przez kolejne 20 minut przy mocy 1000 W;
3. chłodzenie trwające 20 minut, w trakcie którego temperatura próbki spada do około 60°C.

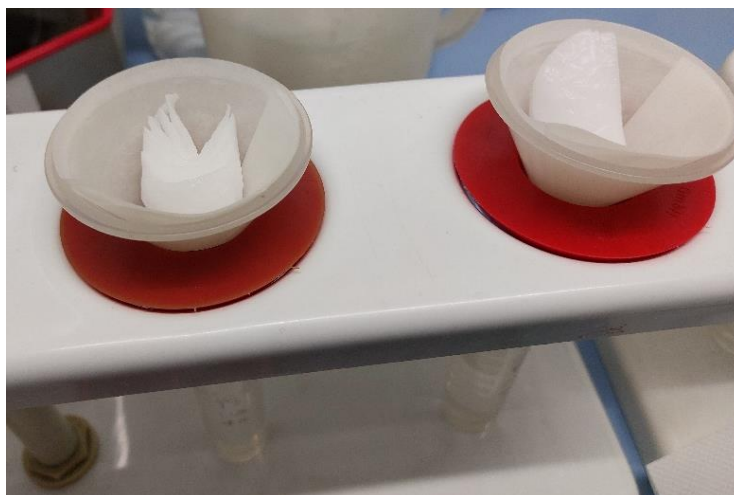
Cały proces trwa 60 minut [Kozak 2012; Norma PN-EN 14902:2010].

**Tabela 5.** Etapy mineralizacji

Etapy mineralizacji	Czas [min]	Moc [W]	Temperatura [°C]
1. Ogrzewanie	20 min	1000	Wzrost od temperatury pokojowej do 180°C
2. Dalsze ogrzewanie i utrzymanie	20 min	1000	Wzrost i utrzymanie temperatury równej 220°C
3. Chłodzenie	20 min	0	Spadek temperatury do około 60°C

Źródło: Opracowano na podstawie [Norma PN-EN 14902:2010]

Po procesie mineralizacji naczynia wymagały ostudzenia do temperatury pokojowej. Naczynia otworzono nad wyciągiem, a ich zawartość przesączono do kolb pomiarowych o objętości 50 ml. Proces sączenia przedstawiono na rysunku 23. Warto zaznaczyć, że naczynia przepłukano wodą dejonizowaną, aby upewnić się, że cały roztwór został przeniesiony do kolby [Kozak 2012; Norma PN-EN 14902:2010].



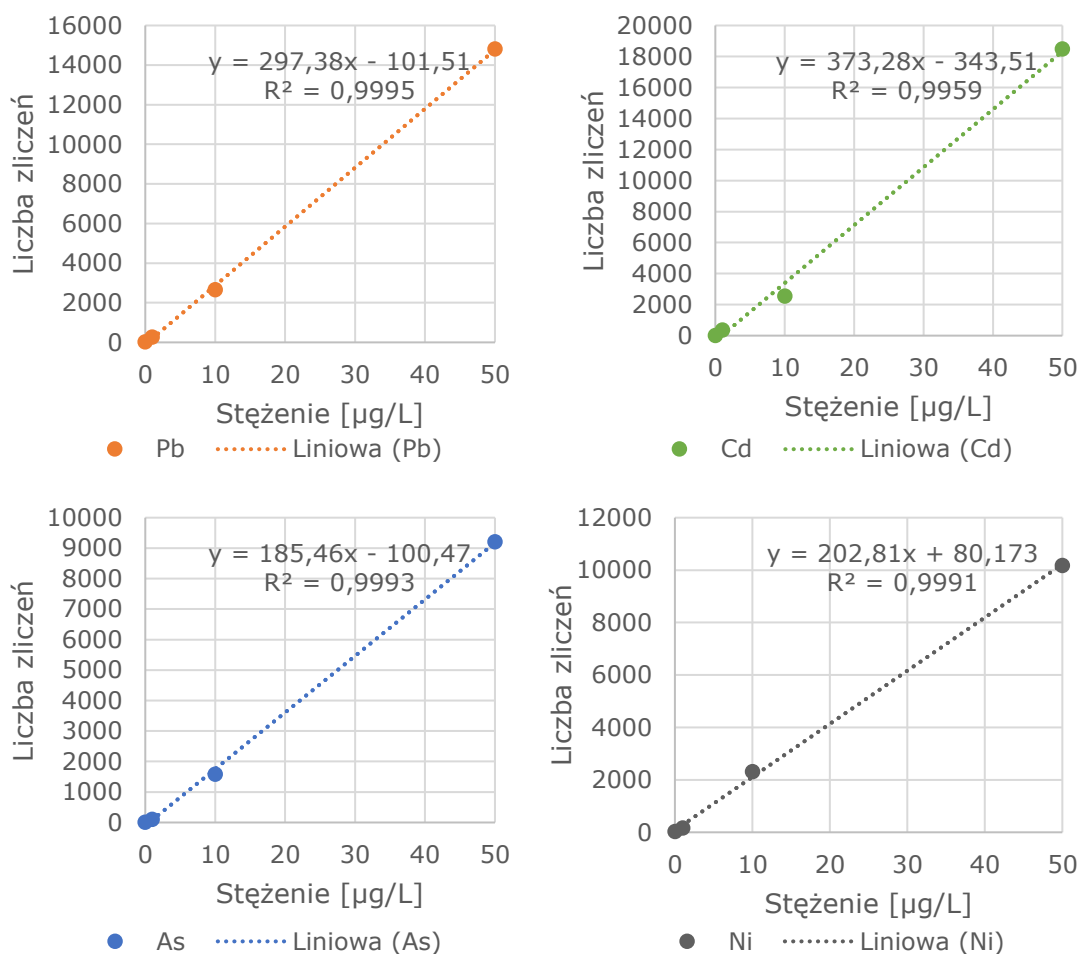
**Rys. 23.** Sączenie filtrów po mineralizacji  
Źródło: własne

- IV. **Przygotowanie roztworów do kalibracji.** W celu zapewnienia dokładnych i wiarygodnych wyników analizy spektrometrycznej przygotowano roztwory kalibracyjne z wykorzystaniem wielopierwiastkowego roztworu podstawowego o certyfikowanym stężeniu 10 mg/l. Przygotowano kolby miarowe o pojemności 50 ml. Do każdej z nich dodano 8 ml kwasu azotowego (V) oraz 2 ml nadtlenu wodoru, aby zapewnić identyczną matrycę w roztworach kalibracyjnych i roztworach próbek. Następnie uzupełniono je wodą dejonizowaną oraz dodano odpowiednią objętość wzorca podstawowego, otrzymując końcowe roztwory kalibracyjne o następujących stężeniach: 0 ug/L (blank – próba ślepa), 1 ug/L, 5 ug/L, 10 ug/L oraz 25 ug/L obejmujących zakres oczekiwanych stężeń ołowiu, kadmu, arsenu i niklu w badanych próbkach [Norma PN-EN 14902:2010; Stepnowski, Synak i in. 2010].
- V. **Kalibracja spektrometru.** Przygotowano roztworów kalibracyjnych o znanych stężeniach (0 ug/L (blank – próba ślepa), 1 ug/L, 10 ug/L oraz 50 ug/L) dla pierwiastków Pb, Cd, As i Ni. Atomy w roztworach po doprowadzeniu do plazmy były wzbudzane, a ich emisja była rejestrowana przez detektor. Na podstawie uzyskanych sygnałów wykreślono krzywe kalibracyjne, oceniając ich liniowość i współczynnik korelacji ( $R^2$ ). Wartość bliska 1 oznacza prawidłową kalibrację urządzenia. Na rysunku 24 przedstawiono wyrysowane krzywe kalibracyjne, z których wynika, że współczynnik ( $R^2$ ) dla ołowiu wynosi 0,9995, dla kadmu - 0,9959, dla arsenu - 0,9993, dla niklu - 0,9991. Wszystkie wartości wskazały na bardzo dobre dopasowanie i potwierdziły dokładność przeprowadzonej kalibracji spektrometru dla analizowanych pierwiastków. Do obliczenia krzywej

kalibracyjnej posłużono się równaniem prostej (11) [Norma PN-EN 14902:2010; Stepnowski, Synak i in. 2010].

$$Y = ac + b \quad (11)$$

Gdzie:  $Y$  – wartość mierzonego sygnału;  $c$  – stężenie substancji w próbce;  $a$  – współczynnik kierunkowy prostej;  $b$  – wartość ślepej próby.



**Rys. 24.** Krzywe kalibracyjne dla: ołowiu (Pb), kadmu (Cd), arsenu (As) oraz niklu (Ni)  
Źródło: opracowanie własne

Dla każdego roztworu zmierzono wartość sygnału detektora, co pozwoliło na precyzyjne ustalenie zależności między intensywnością sygnału a stężeniem pierwiastków. W tabeli 6 przedstawiono wyliczone wartości mierzonego sygnału dla analizowanych pierwiastków. Najwyższą wartość ślepej próby odnotowano dla niklu (28 zliczeń). Mogło to sugerować większą podatność tego pierwiastka na zanieczyszczenia w matrycy lub wyższą bazową emisję sygnału detektora. Różnice w odpowiedzi sygnału dla różnych pierwiastków przy wzrastających

stężeniach są zauważalne, z wyraźnie wyższą czułością detekcji dla kadmu, co może wynikać z jego silniejszej emisji. Wartości sygnału wzrastają w sposób liniowy wraz ze wzrostem stężenia. Potwierdziło to dobrą kalibrację spektrometru i wiarygodność uzyskanych wyników analizy [Norma PN-EN 14902:2010; Stepnowski i in. 2010].

**Tabela 6.** Wyliczona wartość mierzonego sygnału dla ołowiu, kadmu, arsenu oraz niklu

Pierwiastek	„Ślepa próba” 0 [µg/L]	1 [µg/L]	10 [µg/L]	50 [µg/L]	Współczynnik kierunkowy prostej <i>a</i>
Pb	14	257	2653	14810	297,38
Cd	9	356	2549	18482	373,28
As	12	105	1589	9205	185,46
Ni	28	165	2318	10181	202,81

Źródło: opracowanie własne

- VI. **Analiza próbek techniką ICP-AES.** Próbkę w aparacie doprowadzano do plazmy w sposób ciągły. Próbkę poddano rozpylaniu w strumieniu gazu nośnego, tworząc drobną mgłą aerozolową (nebulizacja). Aerozol został następnie równomiernie wprowadzony do plazmy, gdzie przechodził przez strefy ogrzewania, wstępnego promieniowania oraz właściwą strefę analityczną. Pomiar emisji dokonano w ostatniej strefie, gdzie wartość promieniowania emitowanego przez składniki próbki była największa. W celu zwiększenia dokładności analizy każdą próbkę przepuszczono przez system trzykrotnie, co pozwoliło na uzyskanie wiarygodnych wyników [Cygański 2017].
- VII. **Opracowanie wyników.** Następnym etapem było obliczenie: masy analitu, średniej zawartości analitu w filtrze ślepy laboratoryjnym oraz stężenia masowego analitu, a także niepewności procentowej. Do obliczenia masy niklu, arsenu, kadmu i ołowiu zastosowano wzór (12) [Norma PN-EN 14902:2010].

$$m_a = \beta_a * v_s * F * \frac{A_{tot}}{A_{part}} \quad (12)$$

Gdzie:  $m_a$  – masa pobranego analitu  $a$ , ng;  $\beta_a$  – stężenie masowe analitu  $a$  w roztworze próbki, ng/ml;  $v_s$  – objętość roztworu próbki, ml;  $F$  – współczynnik rozcieńczenia ( $F = 1$  przy braku rozcieńczenia próbki), -;  $A_{tot}$  – całkowita powierzchnia eksponowanego filtra,  $cm^2$ ;  $A_{part}$  – powierzchnia roztworzonej części filtra,  $cm^2$ .

Aby obliczyć średnią zawartość w filtrze ślepy laboratoryjnym, skorzystano ze wzoru (13) [Norma PN-EN 14902:2010].

$$\bar{m}_{La} = \frac{\sum_{j=1}^n m_{Laj}}{n} \quad (13)$$

Gdzie:  $\bar{m}_{La}$  – średnia zawartość analitu  $a$  w filtrze ślepy laboratoryjnym, ng;  $m_{Laj}$  – masa analitu  $a$  w filtrze ślepy laboratoryjnym  $j$ , ng;  $n$  – liczba filtrów ślepych laboratoryjnych.

Stężenia ołowiu, kadmu, arsenu oraz niklu w powietrzu atmosferycznym zostały wyliczone na podstawie wzoru (14). 24-godzinna objętość zassanego powietrza wyniosła 54,9 m<sup>3</sup>. Wyniki umieszczono w załączniku 8 do pracy [Norma PN-EN 14902:2010].

$$C_a = \frac{m_a - \bar{m}_{La}}{V} \quad (14)$$

Gdzie:  $C_a$  – stężenie masowe analitu  $a$  w próbce powietrza, ng/m<sup>3</sup>;  $m_a$  – masa pobranego analitu  $a$ , ng;  $\bar{m}_{La}$  – średnia zawartość analitu  $a$  w filtrze ślepy laboratoryjnym, ng;  $V$  – objętość pobranego powietrza, m<sup>3</sup>.

VIII. **Walidacja.** Wyliczono wykrywalność urządzenia, wykrywalność metody oraz poddano ocenie wiarygodność uzyskanych wyników. W celu wyliczenia wykrywalności urządzenia wyliczono odchylenie standardowe stężenia metali w roztworach próbek ślepych odczynnikowych przy użyciu wzoru (15). Następnie obliczono wykrywalność urządzenia dla metali na podstawie wzoru (16). Średnia wartość stężenia metali w próbkach ślepych wynosiła 0,118 ng/ml dla ołowiu, 0,061 ng/ml dla kadmu, 0,099 ng/ml dla arsenu oraz 0,128 ng/ml dla niklu. Odchylenie standardowe wynosiło odpowiednio 0,0012 ng/ml dla ołowiu, 0,0008 ng/ml dla kadmu, 0,0129 ng/ml dla arsenu oraz 0,0175 ng/ml dla niklu. Obliczone wartości wykrywalności urządzenia wynosiły: 0,0027 ng/ml dla ołowiu, 0,0018 ng/ml dla kadmu, 0,0236 ng/ml dla arsenu oraz 0,0321 ng/ml dla niklu. Podane wartości wskazują na wysoką czułość metody analitycznej, zwłaszcza dla ołowiu, kadmu, gdzie granice wykrywalności są bardzo niskie. Wyższa granica wykrywalności dla niklu może być efektem

większej zmienności sygnału tła w przypadku tego pierwiastka. Wszystkie wartości przedstawiono w tabeli 7 [Norma PN-EN 14902:2010].

$$S_{RBa} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{C}_{RBa} - \bar{C}_{RBa,i})^2}{n-1}} \quad (15)$$

Gdzie:  $S_{RBa}$  – odchylenie standardowe stężenia analitu  $a$  w roztworach próbek ślepych odczynnikowych, ng/ml;  $C_{RBa,i}$  – pojedyncza wartość  $i$  stężenia analitu  $a$  w roztworach próbek ślepych odczynnikowych;  $\bar{C}_{RBa}$  – średnia wartość stężenia analitu  $a$  w roztworach próbek ślepych odczynnikowych;  $n$  – liczba roztworów próbek ślepych odczynnikowych.

$$DL_{Ia} = t_{f=n-1, P=0,95} * S_{RBa} \quad (16)$$

Gdzie:  $DL_{Ia}$  – wykrywalność urządzenia dla analitu  $a$ , [ng/ml];  $t_{f=n-1, P=0,95}$  – współczynnik testu t-Studenta dla  $n$  pomiarów przy  $P=0,95$  (rozkład symetryczny).

**Tabela 7.** Wyliczone wartości wykrywalności urządzenia

Pierwiastek	$S_{RBa}$ [ng/ml]	$C_{RBa}$ [ng/ml]	$DL_{Ia}$ [ng/ml]
Ołów	0,0012	0,118	0,0027
Kadm	0,0008	0,061	0,0018
Arsen	0,0129	0,099	0,0236
Nikiel	0,0175	0,128	0,0321

Źródło: opracowanie własne

W celu obliczenia wykrywalności metody konieczne było obliczenie odchylenia standardowego zawartości w roztworach filtrów ślepych laboratoryjnych z wykorzystaniem wzoru (x). Wykrywalność metody wyliczono według wzoru (x). Warto zaznaczyć, że średnica filtra wynosiła 47 mm, a dla danej ślepej użyto 7 połówek filtrów, co dało wartość 6069 mm<sup>2</sup> powierzchni filtra. Średnia wartość stężenia metali w roztworach filtrów ślepych laboratoryjnych wynosiła 0,613 ng/ml dla ołowiu, 0,0092 ng/ml dla kadmu, 0,301 ng/ml dla arsenu oraz 2,708 ng/ml dla niklu. Odchylenie standardowe wynosiło odpowiednio 0,012 ng/ml dla ołowiu, 0,000094 ng/ml dla kadmu, 0,0074 ng/ml dla arsenu oraz 0,00137 ng/ml dla niklu. Wyliczone wartości wykrywalności metody wskazują na wysoką czułość analityczną, zwłaszcza dla kadmu i arsenu, gdzie granice

wykrywalności wynoszą odpowiednio 0,1085 ng/(7 połówek filtrów) i 0,1262 ng/(7 połówek filtrów). Nieco wyższe wartości wykrywalności dla arsenu i niklu (0,1521 ng/(7 połówek filtrów) i 0,2064 ng/(7 połówek filtrów) świadczyły o większej zmienności sygnału tła oraz wyższemu stężeniu analitów w tych próbkach. Wyliczone wartości przedstawiono w tabeli 8 [Norma PN-EN 14902:2010].

$$S_{LBa} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (\bar{m}_{La} - m_{La,j})^2}{n-1}} \quad (17)$$

Gdzie:  $S_{LBa}$  – odchylenie standardowe stężenia analitu  $a$  w roztworach filtrów ślepych laboratoryjnych, ng/ml;  $m_{LBa}$  – średnia wartość zawartości analitu  $m$  w roztworach filtrów ślepych laboratoryjnych, ng;  $m_{LBaj}$  – pojedyncza wartość zawartości analitu  $m$  w roztworze filtru ślepego laboratoryjnego, zmierzona w  $j$ -tej próbce, ng;  $n$  – liczba roztworów filtrów ślepych laboratoryjnych.

$$DL_{La} = t_{f=n-1, P=0,95} * S_{RBa} \quad (18)$$

Gdzie:  $DL_{La}$  – wykrywalność metody dla analitu  $a$ , [ng/filtr];  $t_{f=n, P=0,95}$  – współczynnik testu t-Studenta dla  $n$  pomiarów przy  $P=0,95$  (rozkład symetryczny)

**Tabela 8.** Wyliczone wartości wykrywalności metody

Pierwiastek	$SL_{Ba}$ [ng/ml]	$m_{LBa}$ [ng/ml]	$DL_{La}$ [ng/filtr*]
Ołów	0,012000	0,6130	0,00270
Kadm	0,000094	0,0092	0,00021
Arsen	0,007400	0,3010	0,15210
Nikiel	0,001370	2,7080	0,00310

\* - filtr oznacza powierzchnię wynikającą z siedmiu połówek filtrów o średnicy 47 mm, co daje łączną powierzchnię równą 6069 mm<sup>2</sup>

Źródło: opracowanie własne

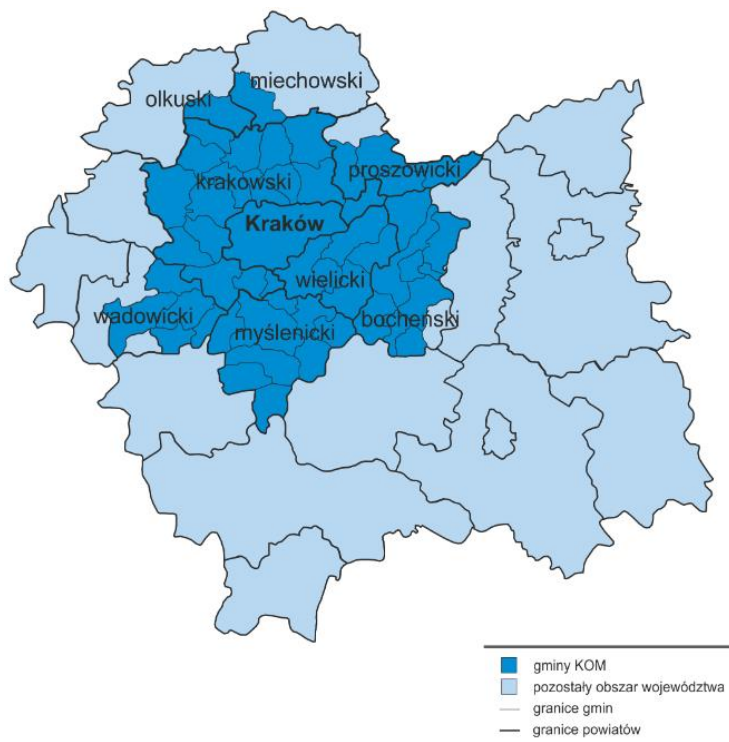
Na wiarygodność uzyskanych wyników składają się: powtarzalność (trzykrotna analiza próbek); liniowość (metodę sprawdzono na podstawie krzywych kalibracyjnych, uzyskanych dla stężeń 0 ug/L (próba ślepa), 1 ug/L, 10 ug/L oraz 50 ug/L); współczynniki determinacji ( $R^2$ ) dla wszystkich pierwiastków bliskie 1, co wskazuje na bardzo dobrą liniowość w badanym zakresie stężeń.

Przeprowadzono walidację, w ramach której obliczono wykrywalność urządzenia i metody. Potwierdzono wysoką czułość analityczną oraz wiarygodność uzyskanych wyników, szczególnie w odniesieniu do zdolności wykrywania niskich stężeń pierwiastków.

### **3.2. Charakterystyka aglomeracji krakowskiej**

Poruszając temat aglomeracji krakowskiej, konieczne jest wyjaśnienie jej definicji. Termin aglomeracji miejsko-przemysłowej został wprowadzony przez Stanisława Leszczyńskiego, który zaproponował tę koncepcję w celu podkreślenia znaczenia przemysłu dla rozwoju obszarów miejskich. Definiuje on obszar charakteryzujący się dużym skupiskiem ludności, przemysłu oraz usług, spełniający określone kryteria dotyczące zagęszczenia populacji, struktury zatrudnienia oraz dostępności samej infrastruktury [Małecki i in. 1998].

Aglomeracja krakowska zlokalizowana jest w południowej części Polski na terenie województwa małopolskiego. Centrum aglomeracji stanowi w całości miasto Kraków oraz kilka miejscowości, w tym Bochnia, Krzeszowice, Myślenice, Skawina i Wieliczka [Parysek 2008; Rus 2020]. Jej obszar zamieszkuje około 1 miliona osób i jest to aglomeracja monocentryczna. Można się również spotkać z pojęciem Krakowski Obszar Metropolitalny, który obejmuje miasto Kraków oraz powiaty: bocheński, krakowski, miechowski, myślenicki, proszowicki, wielicki, co przedstawiono na rysunku 25. Obszar ten jest geograficznie bardzo zróżnicowany. W północno-zachodniej części znajdują się Wyżyna Olkuska, Rów Krzeszowicki i Garb Tenczyński, z cennymi przyrodniczo Dolinkami Krakowskimi oraz Ojcowskim Parkiem Narodowym. W północno-wschodniej i wschodniej części przeważają rolnicze tereny Wyżyny Miechowskiej, Płaskowyżu Proszowickiego oraz Niziny Nadwiślańskiej z wieloma meandrami i starorzeczami Wisły. Południowa część regionu jest silnie pofałdowana o dużych różnicach wysokości, w skład której wchodzi Pogórze Wielickie. Niektóre z tych form geograficznych są usytuowane blisko centrum Krakowa. Takie ukształtowanie terenu sprawia trudności w budowie ciągów komunikacyjnych i infrastruktury liniowej, a także wpływa na zmienne warunki klimatyczne. Położenie Krakowa w obniżeniu terenu stwarza niekorzystne warunki arosanitarne [Uchwała 2018].

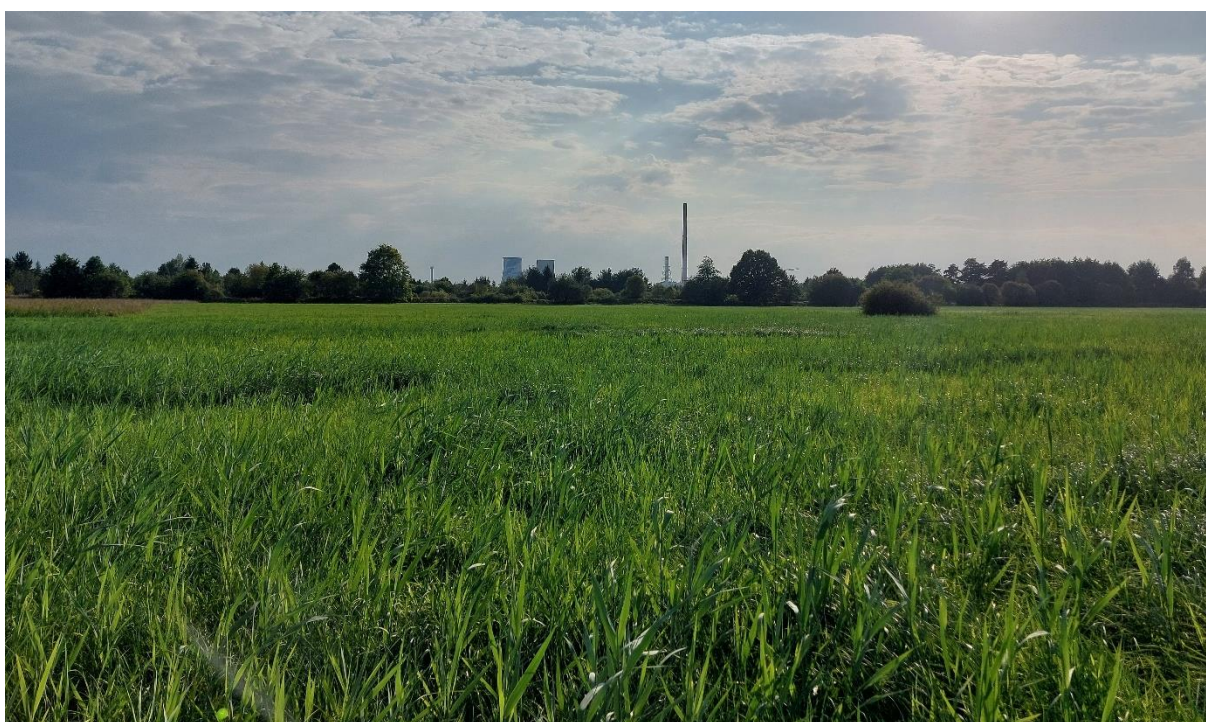


**Rys. 25.** Krakowski Obszar Metropolitalny na tle województwa małopolskiego  
 Źródło: [Urząd Statystyczny 2016]

Aglomeracja krakowska jest obszarem o wysokim współczynniku zagrożeń ekologicznych, zdrowotnych i epidemicznych oraz społecznych i gospodarczych (wypadki drogowe, przestępstwa i wykroczenia). Wśród zagrożeń ekologicznych wyróżnia się narażenie na susze, pożary i powodzie. Jakość powietrza w aglomeracji krakowskiej jest niska z powodu emisji zanieczyszczeń pochodzących z działalności przemysłowej oraz spalania węgla słabej jakości w kotłach o niskiej efektywności grzewczej. Ponadto, z uwagi na przepływającą rzekę Wisłę i jej dopływy oraz przy wskaźniku gęstości zaludnienia w dorzeczu górnej Wisły przekraczającym średnią krajową o 40%, notuje się zagrożenia powodziowe. W aspekcie zdrowotnym i gospodarczym duża liczba mieszkańców sprzyja rozprzestrzenianiu się chorób, a pandemia COVID-19 przyczyniła się do wzrostu bezrobocia i do problemów finansowych mieszkańców aglomeracji [Rus 2020].

W aglomeracji krakowskiej usytuowane są duże zakłady przemysłowe, znaczące zarówno pod względem emisyjnym, jak i estetycznym. Przemysłowy krajobraz odznacza się intensywną działalnością eksploatacyjną związaną z przetwarzaniem surowców. W przeszłości o lokalizacji zakładów przemysłowych decydowały czynniki polityczne i prawno-administracyjne. Rozwój Nowej Huty był

uwarunkowany głównie z decyzjami politycznymi. Ponadto obecność dużych zakładów przemysłowych wiązała się z powstawaniem osiedli robotniczych, które całkowicie przekształcały środowisko [Myga-Piątek 2012]. Krajobraz przemysłowy często wyróżnia się na tle krajobrazu naturalnego lub rolniczego, tworząc wyraźny kontrast fizjonomiczny widoczny na rysunku 26. W miarę rozwoju osiedli mieszkaniowych na terenie Krakowa zakłady przemysłowe zlokalizowane na obrzeżach znalazły się w strefach mieszkalnych. Prowadziło to i nadal prowadzi do problemów społecznych, zwłaszcza do pogorszenia jakości życia mieszkańców tych stref [Małecki i in. 1998].



**Rys. 26.** Kontrast fizjonomiczny miasta – Łąki Nowohuckie w Krakowie  
Źródło: własne

Aglomeracja jest również dobrze rozwinięta pod względem komunikacyjnym. Wpływa na to przede wszystkim obecność szlaków komunikacyjnych, autostrada A4 oraz droga ekspresowa S7. Port Kraków-Balice jest drugim w Polsce pod względem liczby obsługiwanych pasażerów [Rus 2020].

### **Warunki mikroklimatyczne aglomeracji krakowskiej**

Mikroklimat miasta Krakowa różni się znacząco od klimatu pozamiejskiego. Porównując dane dla Krakowa oraz Balic od 2019 roku do 2023 roku, notuje się kilka znamienych różnic. W mieście występują wyższe temperatury powietrza niż na jego obrzeżach (średnio o 0,6°C). Zjawisko to zwane jest miejską wyspą ciepła,

tworzącą się w strefie akumulacji ciepła. Największe różnice temperatur można zaobserwować w porach nocnych, szczególnie w okresie chłodnym. Gęsta zabudowa w Krakowie powoduje zwiększenie szorstkości terenu, co zmniejsza prędkość wiatru średnio o 0,3 km/h. Prędkość i kierunek wiatru w aglomeracji krakowskiej są kształtowane przez czynniki działające na różnych skalach. Skala synoptyczna, czyli czynniki na dużych obszarach związane z cyrkulacją powietrza na poziomie kontynentalnym, ma największy wpływ na warunki anemologiczne. W skali regionalnej, na obszarze obejmującym nawet do kilkuset kilometrów, ukształtowanie terenu (góry, wzniesienia, doliny) wpływa na zmianę prędkości wiatru, natomiast w skali lokalnej, obejmującej mały obszar, do zmian wiatrowych przyczyniają się czynniki: szorstkość terenu oraz jego pokrycie (lasy, wody, budowle). Z uwagi na położenie Krakowa w dolinie Wisły, a także występowanie ograniczeń: od północy Wyżyny Śląsko-Małopolskiej, a od południa pasma Beskidów, w Krakowie dominuje wiatr zachodni. Zmienne ukształtowanie terenu ma również wpływ na występowanie inwersji temperatury, powodującej stabilne, w tym przypadku niekorzystne, warunki atmosferyczne. Zjawisko nasila napływ zimnego powietrza w dół zboczy, a także obecność rzek. W efekcie duża pojemność cieplna wody wpływa na stopień nagrzewania, a parowanie podwyższa temperaturę powietrza. Wolniejsze nagrzewanie wód niż powierzchni terenu zmniejsza występowanie chwiejnej (dynamicznej) równowagi atmosferycznej nad jej powierzchnią. W przypadku zachmurzenia w mieście często występują chmury konwekcyjne, które zmniejszają liczbę chmur warstwowych. Chmury burzowe częściej tworzą się nad źródłami punktowymi, emitującymi duże ilości energii cieplnej oraz pary wodnej, a największe zachmurzenie można zaobserwować w okresie zimowym [Godłowska 2019; Matuszko, Piotrowicz 2015; [www.meteoblue.pl](http://www.meteoblue.pl)].

W okresie od 2019 roku do 2023 roku zachmurzenie w centrum Krakowa było średnio o 0,2% większe niż w peryferyjnych dzielnicach, np. w Balicach. Ponadto klimat miasta, który charakteryzuje się wyższymi temperaturami oraz większym stężeniem zanieczyszczeń, sprzyja większej ilości opadów oraz występowaniu burz. Na wzrost opadów wpływają konwekcja termiczna i silne prądy wstępujące, a także niestabilne warunki atmosferyczne. Pyły zawieszane w powietrzu, których jest więcej w mieście, zawierają aktywne jądra kondensacji (pyły), co sprzyja większemu zachmurzeniu oraz tworzeniu się kropeł wody w atmosferze. Wartości opadów deszczu oraz śniegu były porównywalne.

Wilgotność względna powietrza na wysokości 2 m jest większa poza Krakowem, średnio o 2,9%. Różnica wynika ze struktury zabudowy miejskiej, która szybko odprowadza wodę, oraz bujnej roślinności w Balicach, co przyczynia się do większej wilgotności powietrza. Mgły w mieście występują najczęściej rano, natomiast poza Krakowem utrzymują się dłużej, aż do południa. Ciśnienie powietrza jest porównywalne zarówno w przypadku dzielnic (Balice - Instytut Badawczy), jak i centrum Krakowa (Ogród Botaniczny), około 1016 hPa. Dokładne wyniki pomiarowe dla okresu pięciu lat przedstawiono w tabeli 9 [Matuszko, Piotrowicz 2015; www.meteoblue.pl].

**Tabela 9.** Średnie wartości wybranych parametrów klimatu w Krakowie i Balicach (2019–2023)

<b>Parametr</b>	<b>Kraków</b>	<b>Balice</b>
Ciśnienie powietrza [hPa]	1015,87	1015,89
Opady deszczu [mm]	0,05	0,05
Opady śniegu [cm]	0,003	0,004
Prędkość wiatru na wysokości 10 m [km/h]	14,54	14,82
Temperatura na wysokości 2 m [°C]	11,37	10,77
Wilgotność względna powietrza na wysokości 2 m [%]	67,10	70,01
Zachmurzenie [%]	48,76	48,57

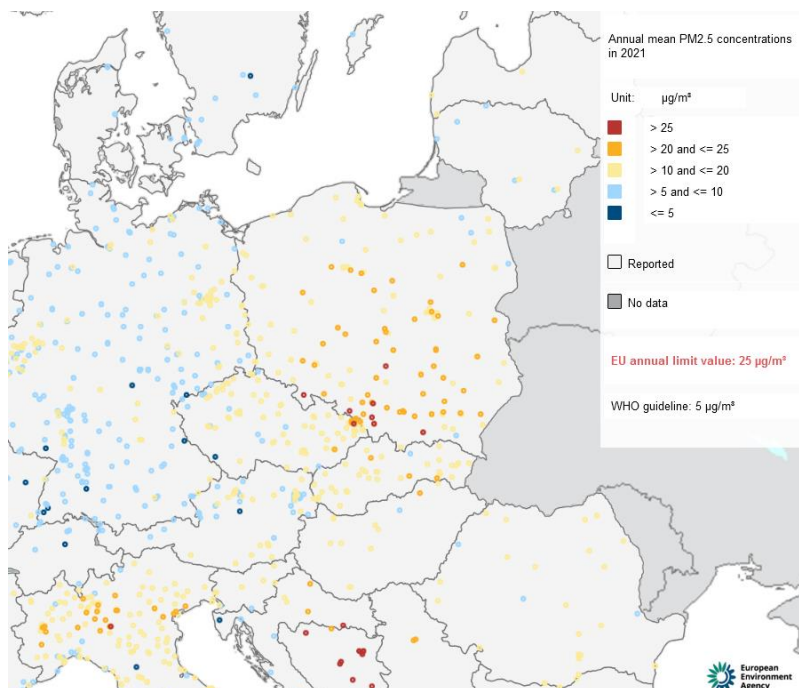
Źródło: Opracowano na podstawie danych [www.meteoblue.pl]

### **Zanieczyszczenie pyłowe w aglomeracji krakowskiej**

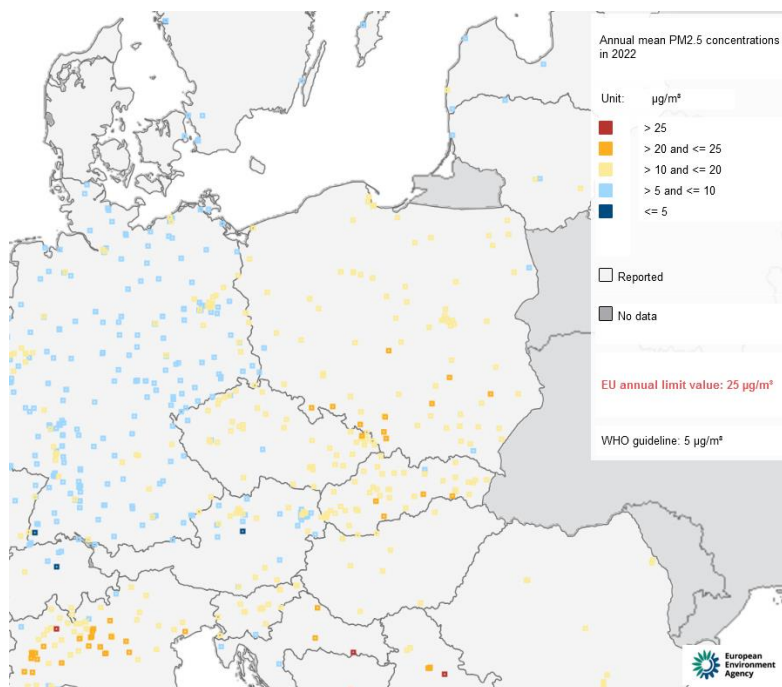
Aglomeracja krakowska zmaga się z problemem zanieczyszczenia powietrza, a w szczególności z pyłami zawieszonymi [Polski Klub Ekologiczny 2018].

Analizując sprawozdanie Europejskiej Agencji Środowiska (EEA) z 2023 roku za 2021 rok oraz 2022 rok, można zauważyć narastający problem zanieczyszczenia powietrza pyłami PM<sub>2,5</sub> w Krakowie. Potwierdziły to załączone ilustracje (rysunek 27, rysunek 28), na których przedstawiono mapy rocznych stężeń pyłu w 2021 roku oraz w 2022 roku. W 2021 roku, na podstawie danych automatycznych stacji pomiarowych Kraków, Aleja Krasińskiego, roczne stężenie wyniosło 25 µg/m<sup>3</sup>, natomiast na stacjach Kraków, ul. Bulwarowa oraz Kraków, os. Piastów, wyniosło po 24 µg/m<sup>3</sup>. Oznacza to, że wartość stężenia pyłów PM<sub>2,5</sub> w Krakowie zrównała się z rocznym limitem ustalonym przez Unię Europejską. Warto podkreślić, że wartość w Krakowie pięciokrotnie przekroczyła poziom równy 5 µg/m<sup>3</sup>, który jest wyznaczony przez Światową Agencję Środowiska (WHO). W przypadku 2022 roku zarejestrowano poprawę jakości powietrza w Krakowie, gdzie na podstawie danych ze stacji Kraków, ul. Bulwarowa, roczna wartość stężenia pyłów PM<sub>2,5</sub> wyniosła 18 µg/m<sup>3</sup>, osiągając wynik poniżej limitu dopuszczalnego. Niestety wciąż

przekroczony był średnioroczny poziom pyłów zalecany przez *WHO* o  $13 \mu\text{g}/\text{m}^3$  [www.eea.europa.eu].



**Rys. 27.** Stężenia  $\text{PM}_{2,5}$  w 2021 roku w odniesieniu do rocznej wartości dopuszczalnej UE oraz rocznego poziomu wytycznych *WHO*  
Źródło: [www.eea.europa.eu]



**Rys. 28.** Stężenia  $\text{PM}_{2,5}$  w 2022 roku w odniesieniu do rocznej wartości dopuszczalnej UE oraz rocznego poziomu wytycznych *WHO*  
Źródło: [www.eea.europa.eu]

Wdrożone od 2019 roku zalecenia uchwały antysmogowej doprowadziły do likwidacji tysięcy pieców i kotłów zasilanych paliwami stałymi. Dzięki temu

obniżono poziom stężenia pyłów zawieszonych w Krakowie [Rataj, Holewa-Rataj 2020].

### **Źródła punktowe w aglomeracji krakowskiej**

Jak wcześniej wspomniano, w aglomeracji krakowskiej zlokalizowanych jest wiele zakładów przemysłowych oraz dużych obiektów infrastruktury transportowej (w szczególności Port Lotniczy), które wytwarzają produkty przemysłowe, ciepło, energię elektryczną, a przy tym emitują szkodliwe substancje do otoczenia. Kumulacja emisji ze wszystkich źródeł prowadzi do znacznego pogorszenia jakości środowiska.

### **ArcelorMittal**

Niewątpliwie najważniejszym emitorem jest Zakład przemysłowy ArcelorMittal Poland SA (rysunek 29), zlokalizowany przy ul. Tadeusza Sendzimira 1, we wschodniej części Krakowa (Dzielnica XVIII Nowa Huta i Dzielnica XVII Wzgórza Krzesławickie) [Pozwolenie zintegrowane 2022].



**Rys. 29.** Zakład ArcelorMittal  
Źródło: własne

Na podstawie decyzji pozwolenia zintegrowanego z dnia 4 sierpnia 2022 roku spółka prowadzi walcownię zimną, która wytwarza blachy walcowane na zimno, nieocynkowane i ocynkowane, oraz ma możliwości nakładania powłok metalicznych i stosowania rozpuszczalników organicznych do obróbki wyrobów.

Technologia obejmuje etapy od wytrawiania blachy, walcowania i wygładzania, po cynkowanie ogniowe i elektrolityczne. Gotowe produkty z blachy trafiają do odbiorców po zakończeniu procesów cynkowania lub cięcia wzdłużnego. Zakłady działają przez cały rok w systemie tryzmianowym, dostosowując konfiguracje do wymagań produkcyjnych. Instalacja do nakładania powłok metalicznych (instalacja cynkowania ogniowego) posiada maksymalną zdolność wsadu równą 173500 kg stali surowej na godzinę. Dopuszczalna roczna wielkość produkcji nie przekracza  $750 \times 10^6$  kg/rok, przy czasie pracy wynoszącym 8760 h/rok. Podstawowym surowcem technologicznym jest blacha produkowana w Zakładzie z walcowania na gorąco i wytrawiania. Ponadto wykorzystywana jest również blacha dostarczana z zewnątrz, transportowana koleją. Roczna wielkość emisji poszczególnych zanieczyszczeń przedstawiono w tabeli 10. Największy udział w zanieczyszczeniach gazowych ma tlenek węgla, którego roczna emisja wynosi  $1,46 \times 10^6$  kg. Pyły PM<sub>2,5</sub> generowane przez Zakład osiągają wartość  $2,418 \times 10^4$  kg/rok. Ponadto Zakład jest źródłem emisji metali ciężkich, takich jak nikiel, którego roczna emisja wynosi 25 kg, oraz ołów, emitowany w ilości 37 kg rocznie. W 2022 roku Zakład posiada 21 emitorów, w skład których wchodzi: walcarka, sześć pieców kołpakowych, wygładzarka, trzy instalacje cynkowania, szlifiernia wałków gumowych, śrutownica, dwie maszyny do teksturowania walców, dwa piece do wyżarzania blach oraz dwie suszarnie gazowe. Najwięcej pyłów PM<sub>2,5</sub> emituje walcarka 4-klatkowa (0,33 kg na godzinę). Nikiel jest emitowany przez sześć pieców kołpakowych japońskich, z emisją godziną równą 0,0006 kg każdy. Ołów w największej ilości emituje instalacja cynkowania ogniowego z emisją równą 0,0011 kg/h. Pozostałe źródła, np. piece kołpakowe francuskie, generują ołów na poziomie 0,0005 kg/h oraz nikiel na poziomie 0,0004 kg/h. Zanieczyszczenia emitowane są na różnych wysokościach, od 9 m do 43 m, a czas pracy waha się w zależności od emitora w przedziale 600-8760 godzin rocznie. Dokładne dane dotyczące emitorów, współrzędne i ich charakterystyki oraz emisja, zostały umieszczone w załączniku 1 do pracy. Podczas cynkowania ogniowego pracują urządzenia odpylające: cyklon z minimalną skutecznością odpylania równą 84% oraz urządzenie mokre z filtrem tkaninowym z minimalną skutecznością odpylania równą 99% [Pozwolenie zintegrowane 2022].

Warto zaznaczyć, że Zakład ten znalazł się w wykazie zakładów na terenie województwa małopolskiego o ryzyku wystąpienia awarii przemysłowej, zawartych w Uchwale nr XLVII/732/18 Sejmiku Województwa Małopolskiego, z dnia 26 marca

2018 roku. Obiektowi przypisano duże ryzyko wystąpienia poważnej awarii przemysłowej [Uchwała 2018].

**Tabela 10.** Dopuszczalna roczna wartość emisji zanieczyszczeń z Zakładu

Lp.	Nazwa zanieczyszczenia	Roczna wartość emisji [kg/rok]
1	Pył	61780
2	Pył zawieszony PM10	26980
3	Pył zawieszony PM2,5	24180
4	Chrom	95
5	Miedź	42
6	Ołów	37
7	Nikiel	25
8	Mangan	24
9	Żelazo	3400
10	Dwutlenek siarki	$1,044 \times 10^5$
11	Dwutlenek azotu	$2,879 \times 10^5$
12	Tlenek węgla	$1,4643 \times 10^6$
13	Węglowodory alifatyczne	630
14	Cynk	1610

Źródło: [Pozwolenie zintegrowane 2022]

Działalność huty ma istotny wpływ nie tylko na powietrze atmosferyczne, ale też na inne komponenty środowiska. Rozproszenie emitorów oraz zróżnicowane ich wysokości powodują lokalne zanieczyszczenie, lecz również przemieszczanie się związków na duże odległości. Emisja zanieczyszczeń w wyniku ciągłej pracy może powodować problemy zdrowotne mieszkańców, zwłaszcza układu oddechowego. Emisja metali ciężkich stanowi istotne źródło zanieczyszczeń, które negatywnie oddziałuje na zdrowie. Konieczny jest zatem ciągły monitoring emitowanych zanieczyszczeń i wdrożenie działań w celu zminimalizowania niekorzystnego wpływu Zakładu na otoczenie.

### **Elektrociepłownia Kraków**

Ważnym obiektem punktowym na terenie aglomeracji krakowskiej jest Elektrociepłownia należąca do PGE Energia Ciepła SA (rysunek 30), która jest zlokalizowana przy ul. Ciepłowniczej 1 w Krakowie (Dzielnica XIV Czyżyny) [Pozwolenie zintegrowane 2020].



**Rys. 30.** Elektrociepłownia Kraków  
Źródło: własne

Zgodnie z decyzją pozwolenia zintegrowanego z dnia 15 lipca 2020 roku Zakład zajmuje się wytwarzaniem energii elektrycznej, pary wodnej i gorącej wody oraz produkcją gipsu. Na potrzeby wytwarzania energii elektrycznej oraz ciepłej w kogeneracji Zakład korzysta z instalacji spalania paliw, o mocy przekraczającej 50 MW, w której spalane są węgiel kamienny i biomasa. W skład instalacji wchodzi blok energetyczny oraz kotły rezerwowo-szczytowe. Produktem ubocznym odsiarczania są związki siarki, które wykorzystywane są do produkcji gipsu syntetycznego. Wyprodukowana energia cieplna trafia do miejskiego systemu ciepłowniczego Krakowa, natomiast elektryczna zasila krajowy system elektroenergetyczny. Do podstawowych jednostek wytwórczych w obiekcie należą cztery bloki energetyczne oraz kotły wodne o łącznej mocy cieplnej 1827 MW. Zainstalowana moc elektryczna wynosi 460 MW<sub>el</sub>. W skład eksploatowanej instalacji wchodzi: instalacja spalania paliw oraz instalacje powiązane, do których należą: instalacja wytwarzania energii, instalacja wyprowadzania mocy, instalacje olejowe, instalacja oczyszczania spalin, instalacja gospodarki odpadowej oraz instalacja składowania i transportu paliw. Szczegółowe informacje dotyczące zdolności produkcyjnej oraz zużycia surowców przedstawiono w tabeli 11. Wartość produkowanej energii elektrycznej wynosi 2,5 TWh/rok. Na potrzeby własne Zakład zużywa ok. 16% wyprodukowanej energii elektrycznej. Natomiast produkcja energii cieplnej wynosi 10,5 PJ/rok. Na potrzeby produkcji energii elektrycznej oraz ciepłej Zakład zużywa  $1,3 \times 10^9$  kg/rok węgla kamiennego.

**Tabela 11.** Podstawowe surowce i produkty wykorzystywane w Elektrociepłowni

Lp.	Wyszczególnienie	Wielkość
1	Zdolność produkcyjna: Energia elektryczna; Energia cieplna; Gips syntetyczny.	2,5 TWh/rok 10,5 PJ/rok $5,6 \times 10^6$ kg/rok
2	Zużycie paliwa podstawowego - węgla kamiennego	$1,3 \times 10^9$ kg/rok
3	Zużycie biomasy	$1,0 \times 10^9$ kg/rok
4	Zużycie wody: <ul style="list-style-type: none"><li>• Woda chłodząca;</li><li>• Woda przemysłowa.</li></ul>	$3,0 \times 10^6$ m <sup>3</sup> /rok $4,0 \times 10^6$ m <sup>3</sup> /rok
5	Mączka kamienia wapiennego	$3,5 \times 10^6$ kg/rok
6	Roztwór mocznika	$7,0 \times 10^6$ kg/rok
7	Woda amoniakalna	$8,0 \times 10^6$ kg/rok
8	Lekki olej opałowy	$7,0 \times 10^6$ kg/rok

Źródło: [Pozwolenie zintegrowane 2020]

W wyniku spalania węgla kamiennego o wartości opałowej w przedziale 18,5-25 MJ/kg oraz biomasy, której wartość opałowa wynosi 12-20 MJ/kg, w ramach emisji zorganizowanej kotły energetyczne emitują do powietrza szkodliwe substancje. Wysokość głównego emitora E1A wynosi 120 m. Na terenie Zakładu mieszczą się zbiorniki magazynowe (cztery retencyjne na popiół i jeden na mączkę kamienia wapiennego), z których emisja do powietrza zatrzymywana jest na filtrach tkaninowych, toteż emisja z tych zbiorników jest niewielka. Na terenie Zakładu powstaje również emisja niezorganizowana, której źródłem są okresowe pylenia ze składowiska węgla, głównie w czasie suchej i wietrznej pogody, oraz praca spychaczy przy załadunku pyłu ze zbiorników retencyjnych na środki transportu. Emisje pyłów pochodzą również ze spalin pojazdów poruszających się po terenie Zakładu oraz z rozładunku biomasy. Instalacja spalania paliw w warunkach normalnych może działać w trzech wariantach: spalanie węgla kamiennego w kotłach K1-K4 oraz KW-5, jednoczesne spalanie węgla kamiennego i biomasy w kotłach K1-K4, z kotłem OP-380 nr 2 na biomasę, oraz spalanie oleju opałowego lekkiego w kotłach KO1-KO8. Od czasu obowiązywania konkluzji BAT (od 17 sierpnia 2021 r.) średnia miesięczna emisja pyłów, wynikająca ze standardu emisyjnego pyłu w emitorze E1A: dla kotłów K1-K4 wynosi po 20 mg/Nm<sup>3</sup>, natomiast dla kotła KW-5 wynosi po 10 mg/Nm<sup>3</sup>. Podczas współspalania węgla kamiennego i biomasy miesięczna emisja w kotle K2 wynosi 20 mg/Nm<sup>3</sup>. W przypadku emitorów zasilanych olejem lekkim, średnia miesięczna emisja pyłu wynosi: w emitorze E3 oraz E4 po 20 mg/Nm<sup>3</sup>. Dopuszczalną roczną emisję zanieczyszczeń z Zakładu przedstawiono w tabeli 12.

Dopuszczalna emisja pyłów z instalacji wynosi  $6,0 \times 10^5$  kg/rok. Zakład jest również istotnym źródłem emisji dwutlenku siarki oraz tlenków azotu. W celu przeciwdziałania oddziaływania na środowisko w Zakładzie stosuje się optymalizację spalania, urządzenia i technologie redukcji zanieczyszczeń (elektrofiltry, mokre odsiarczanie spalin i odazotowanie). Do redukcji  $\text{NO}_x$ , CO i  $\text{N}_2\text{O}$  stosuje się palniki niskoemisyjne i recyrkulację spalin, natomiast emisję  $\text{SO}_x$ , HCl, HF oraz pyłów i metali są kontrolowane przez odpowiednie parametry kotłów i technologie spalania. Dokładne parametry emitorów zostały przedstawione w załączniku 2 do pracy [Pozwolenie zintegrowane 2020].

**Tabela 12.** Dopuszczalna roczna wielkość emisji zanieczyszczeń z Zakładu

Lp.	Rodzaj zanieczyszczenia	Dopuszczalna emisja [kg/rok]
1	Dwutlenek siarki	$3,65 \times 10^6$
2	Tlenki azotu	$2,7 \times 10^6$
3	Pył	$6,0 \times 10^5$
4	Chlorowodór	$3,5 \times 10^5$
5	Fluorowodór	$1,0 \times 10^5$
6	Amoniak	$1,5 \times 10^5$
7	Rtęć	100

Źródło: [Pozwolenie zintegrowane 2020]

Zastosowanie wysokich emitorów pomaga zapobiegać lokalnemu zanieczyszczeniu powietrza, jednak pyły są przenoszone na większe odległości.

### **Ekospalarnia Kraków**

Zakład Termicznego Przekształcania Odpadów (Ekospalarnia Kraków), przedstawiony na rysunku 31, należy do Krakowskiego Holdingu Komunalnego SA w Krakowie. Zakład mieści się przy ul. Jerzego Giedroycia 23 w Krakowie (Dzielnica XVIII Nowa Huta) [Pozwolenie zintegrowane 2021].



**Rys. 31.** Ekospalarnia Kraków  
Źródło: własne

Zgodnie z decyzją pozwolenia zintegrowanego z dnia 27 września 2021 roku oraz z dnia 27 stycznia 2023 roku, Zakład posiada instalację do termicznego przekształcania odpadów, w skład których wchodzi zarówno odpady niebezpieczne, jak i inne niż niebezpieczne. Proces przekształcania odpadów obejmuje unieszkodliwianie oraz odzysk odpadów, z których produkowane są popioły i żużle. W skład instalacji wchodzi ponadto urządzenia do oczyszczania gazów, a także przetwarzania i magazynowania odpadów. Zakład zajmuje się przetwórstwem głównie niesegregowanych odpadów komunalnych oraz odpadami z mechanicznej obróbki odpadów. Proces termiczny obejmuje dwie niezależne linie technologiczne, w których produkowana jest energia elektryczna i ciepło do zasilania miejskiej sieci ciepłowniczej. Roczna wydajność instalacji wynosi maksymalnie  $2,45 \times 10^8$  kg odpadów, a współczynnik efektywności energetycznej mieści się między 0,963 a 1,001. W tabeli 13 przedstawiono roczną dopuszczalną wielkość emisji poszczególnych zanieczyszczeń do 2 XII 2023 roku. Największy udział w zanieczyszczeniach mają tlenki azotu, których roczna emisja wynosi  $2,58 \times 10^5$  kg/rok. Emisja pyłów wynosi 13014 kg/rok. Wśród metali ciężkich łącznie roczna emisja kadmu i talu wynosi 64 kg/rok, natomiast emisja antymonu, arsenu, ołowiu, chromu, kobaltu, miedzi, manganu, niklu i wanadu wynosi 644 kg/rok. Emisja zorganizowana do powietrza zachodzi w procesie termicznego przekształcania odpadów, kolumnie dezodoryzacyjnej oraz w procesach waloryzacji i stabilizacji pozostałych procesów. Podczas spalania odpadów

i w wyniku pozostałych operacji technologicznych emitowane są zanieczyszczenia, które podlegają redukcji w procesach oczyszczania pyłów i gazów odlotowych (urządzenia odpylające suche i mokre, neutralizacja związków chloru, tlenków azotu, związków siarki i fluoru, usuwanie węgla organicznego, dioksyn i furanów). Niewychwycone substancje uchodzą do atmosfery przez emitory E1 i E2, o wysokości 70 m każdy. Czas pracy każdego z emitorów wynosi 8424 godziny na rok [Pozwolenie zintegrowane 2021]. Dokładne parametry emitorów zostały przedstawione w załączniku 3 do pracy.

**Tabela 13.** Dopuszczalna łączna wartość emisji zanieczyszczeń w ciągu roku dla całej instalacji ZTPO

<b>Lp.</b>	<b>Nazwa zanieczyszczenia</b>	<b>Roczna dopuszczalna wielkość emisji [kg/rok]</b>
1	Pył ogółem	13014
2	Całkowite LZO	12874
3	Chlorowodór	12874
4	Fluorowodór	1287
5	Dwutlenek siarki	64368
6	Tlenek węgla	64368
7	Tlenki azotu	258782
8	Kadm + tal	64
9	Antymon + arsen + ołów + chrom + kobalt + miedź + mangan + nikiel + wanad	664
10	Rtęć	64
11	Dioksyny i furany	0,129*
12	Amoniak	14464
13	Siarkowodór	990
* emisja roczna [g/rok]		

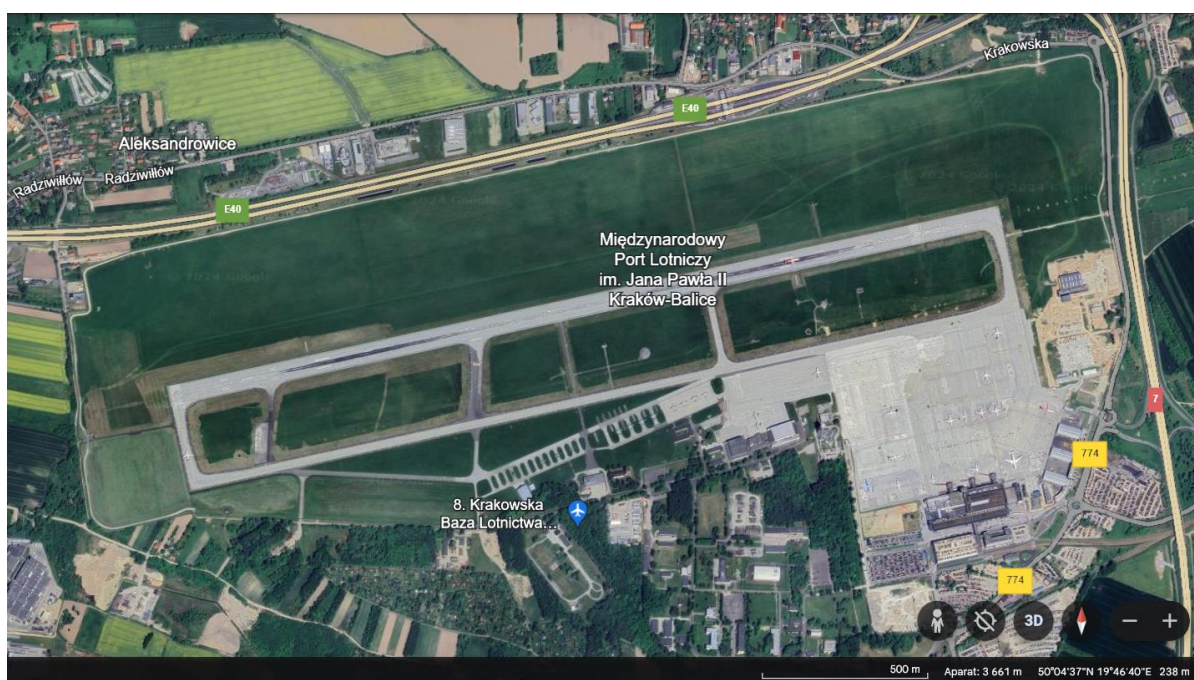
Źródło: [Pozwolenie zintegrowane 2021]

Obiekt wpływa negatywnie na środowisko poprzez emisję różnych zanieczyszczeń, w tym pyłów i metali ciężkich. Pomimo zaawansowanej technologii wychwytywania pyłów i oczyszczania gazów, proces termicznego przekształcania odpadów generuje znaczną ilość zanieczyszczeń. Emisja na wysokim pułapie może powodować zmniejszenie lokalnego zanieczyszczenia, ale przy tym przyczynia się do przemieszczania związków na większe odległości.

### **Port Lotniczy Kraków-Balice**

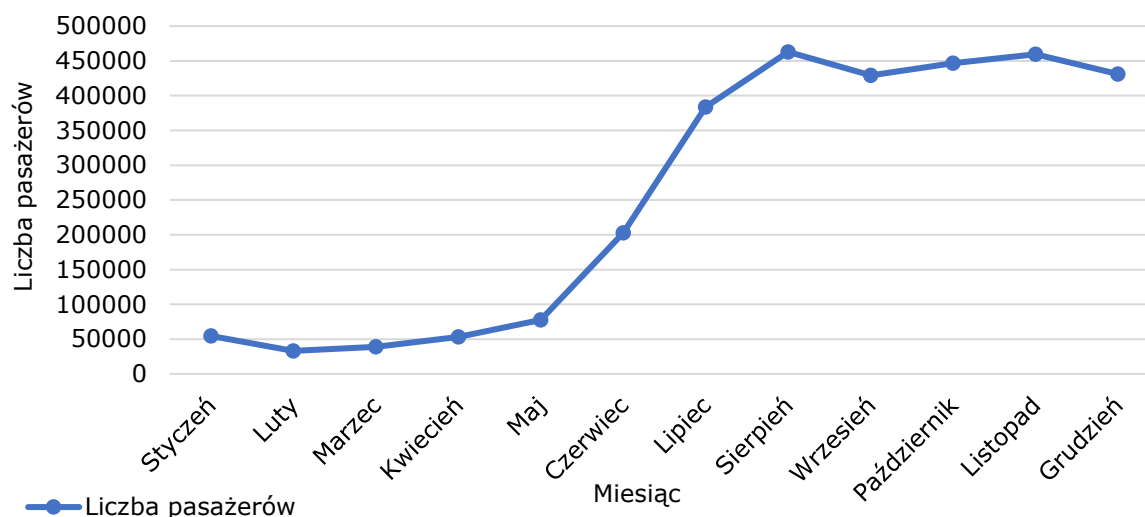
Przykładem obiektu infrastruktury transportowej jest Port Lotniczy Kraków, przedstawiony na rysunku 32. Obiekt mieści się na zachód od Krakowa

w miejscowości Balice, na poziomie 241 m n.p.m. Droga startowa o wymiarach 2600 m x 60 m wiedzie w dwóch kierunkach (70 stopni oraz 250 stopni), a nawierzchnia zbudowana jest z betonu [www.krakowairport.pl]. W 2018 roku został przyjęty Plan Generalny Lotniska Kraków-Balice (2016-2036), zakładający budowę nowej drogi startowej, rozbudowę terminalu pasażerskiego o 28000 m<sup>2</sup> oraz przeniesienie terminalu cargo. Inwestycja ma zwiększyć przepustowość obsługiwanych pasażerów do 12 milionów w ciągu roku [Wróbel 2020].



**Rys. 32.** Port Lotniczy Kraków-Balice  
Źródło: [www.earth.google.com]

Powierzchnia Portu Lotniczego wynosi 310 ha, a w promieniu do 100 km mieszka prawie 8 mln ludzi. Port jest drugim w Polsce obiektem co do liczby obsługiwanych pasażerów rocznie. W 2021 roku lotnisko obsłużyło ponad 3 mln pasażerów, ale z uwagi na okres pandemiczny, od stycznia do maja, liczba lotów była ograniczona, co widać na rysunku 33 [www.krakowairport.pl]. W 2023 roku lotnisko obsłużyło ponad 9,5 miliona osób, a obecnie (2024 r.) kursy prowadzi 27 linii lotniczych [www.krakowairport.pl]. W kontekście ekologicznym Port Lotniczy prowadzi liczne działania w celu ochrony środowiska i minimalizacji negatywnego oddziaływania. Ochrona środowiska realizowana jest poprzez monitoring emisji gazów i pyłów, hałasu, jakości i ilości wód oraz roślinności [Raport zrównoważonego rozwoju 2020].



**Rys. 33.** Liczba pasażerów Portu Lotniczego Kraków-Balice w poszczególnych miesiącach w 2021 roku  
Źródło: [krakowairport.pl]

Port Lotniczy Kraków-Balice wpływa na środowisko poprzez emisję zanieczyszczeń do różnych komponentów środowiska. Eksploatacja samolotów, jak również utrzymanie lotniska generują znaczne ilości pyłów, szczególnie ultradrobnych. Planowana rozbudowa lotniska pogłębi wpływ na środowisko, dlatego konieczne będzie zaproponowanie i wdrożenie dodatkowych działań proekologicznych.

### 3.3. Kryteria wyboru lokalizacji punktów pomiarowych

Kryteria wyboru lokalizacji punktów pomiarowych pełnią istotną rolę w badaniach, gdyż zapewniają reprezentatywne wyniki dla danej dzielnicy. Odpowiednio wybrane lokalizacje punktów pomiarowych były kluczowe w ocenie wpływu źródeł punktowych na mikroklimat aglomeracji krakowskiej. Kryteria wyboru lokalizacji obejmowały między innymi: cel pomiarów, bliskość źródeł punktowych, warunki terenowe i środowiskowe w postaci braku zabudowań i zadrzewień wokół miejsca pomiarowego, bezpieczeństwo i łatwy dostęp do miejsca pomiarowego oraz zgodność z obowiązującymi przepisami.

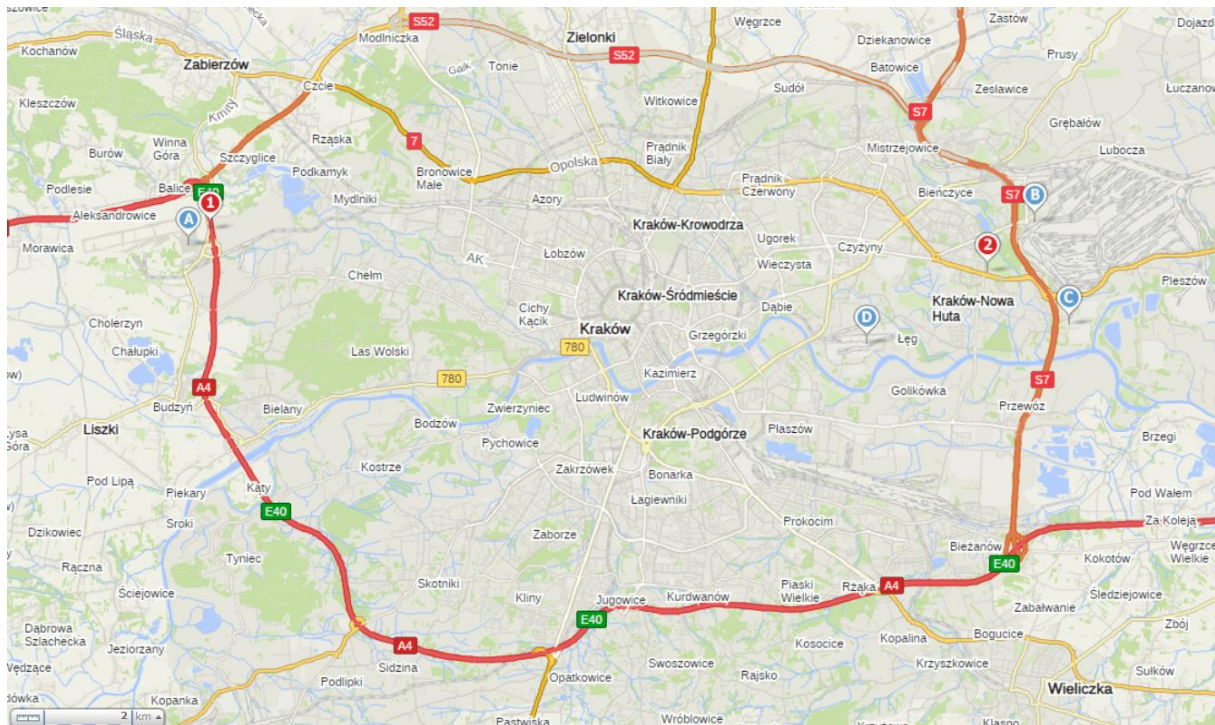
Punkt pomiarowy nr 1, o współrzędnych 50,076824 N i 19,808244 E oraz położeniu na wysokości 234 m n.p.m., znajduje się w pobliżu Międzynarodowego Portu Lotniczego im. Jana Pawła II Kraków-Balice, ul. Kapitana Mieczysława Medweckiego 1, 32-083 Balice. Wytypowanie punktu wynikało z konieczności

przeprowadzenia analizy wpływu Portu Lotniczego na zanieczyszczenie powietrza pyłami PM<sub>2,5</sub>. Miejsce wykonywania pomiarów (rysunek 34) usytuowane jest w odległości około 500 m na wschód od pasa startowego, tuż przy drodze nr 774. Lokalizacja punktu spełnia kryterium dotyczące bliskości źródła zanieczyszczeń. Ponadto pomiary odbywały się na otwartym terenie, a w wytypowanym miejscu nie ma zabudowań od strony pasa startowego, które mogłyby wpłynąć na wyniki pomiarów. Istotnym kryterium była fizyczna możliwość zatrzymania się i przeprowadzenie w sposób bezpieczny regularnych pomiarów metodą automatyczną. Punkt pomiarowy nr 1 spełnia wymagania zawarte w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 11 grudnia 2020 r. w sprawie dokonywania oceny poziomów substancji w powietrzu, gdzie punkt pomiarowy zlokalizowany był pod wiatr, a pomiar odbywał się w strefie oddychania. Również Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/50/WE z dnia 21 maja 2008 r. w sprawie jakości powietrza i czystsze powietrze dla Europy, w Załączniku III, mówi o tym, aby punkt pomiarowy był bezpieczny dla operatora oraz ogólnodostępny. W efekcie zostały spełnione wszystkie założone kryteria.

Wybór punktu pomiarowego nr 2 spełniał założone kryteria. Punkt został wytypowany zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 11 grudnia 2020 r. w sprawie dokonywania oceny poziomów substancji w powietrzu, które omówiono w podrozdziale 2.6. Monitoring powietrza. Punkt pomiarowy nr 2 znajduje się w miejscu stacji pomiarowej Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska Kraków, ul. Bulwarowa, o współrzędnych 50,069308 N i 20,053492 E oraz położeniu na wysokości 195 m n.p.m. Lokalizacja została wybrana ze względu na konieczność przeprowadzenia pomiarów pyłów PM<sub>2,5</sub> w otoczeniu punktowych źródeł. Czerpnia pobornika była umiejscowiona w strefie oddychania (od 1,5 m do 4 m powyżej poziomu gruntu), a przepływ wokół niej nie był ograniczony przez jakiegokolwiek przeszkody, spełniając kryterium warunków terenowych i środowiskowych. Kluczowa była dostępność miejsca, ale również dostępność energii elektrycznej, która mogła zasilać pobornik. Pomiary odbywały się w sposób bezpieczny dla operatora i spełniły wytyczne Dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/50/WE z dnia 21 maja 2008 r. w sprawie jakości powietrza i czystsze powietrze dla Europy szerzej opisane w podrozdziale 2.6. W sąsiedztwie miejsca pomiarowego znajdują się duże zakłady przemysłowe, co spełniło założenie dotyczące bliskości źródła zanieczyszczenia pyłami PM<sub>2,5</sub>:

- ArcelorMittal Poland, ul. Tadeusza Sendzimira 1, 31-752 Kraków, w odległości około 2 km od punktu pomiarowego nr 2;
- Elektrociepłownia PGE Energia Ciepła SA, ul. Ciepłownicza 1, 31-587 Kraków, w odległości około 2 km od punktu pomiarowego nr 2;
- Zakład Termicznego Przekształcania Odpadów (Ekospalarnia) w Krakowie, ul. Jerzego Giedroycia 23, 31-981 Kraków, w odległości około 3,5 km od punktu pomiarowego nr 2.

Badania wykonano metodą grawimetryczną (manualną), spełniając założenia ww. Rozporządzenia. Również w tym przypadku wszystkie założone kryteria zostały spełnione.

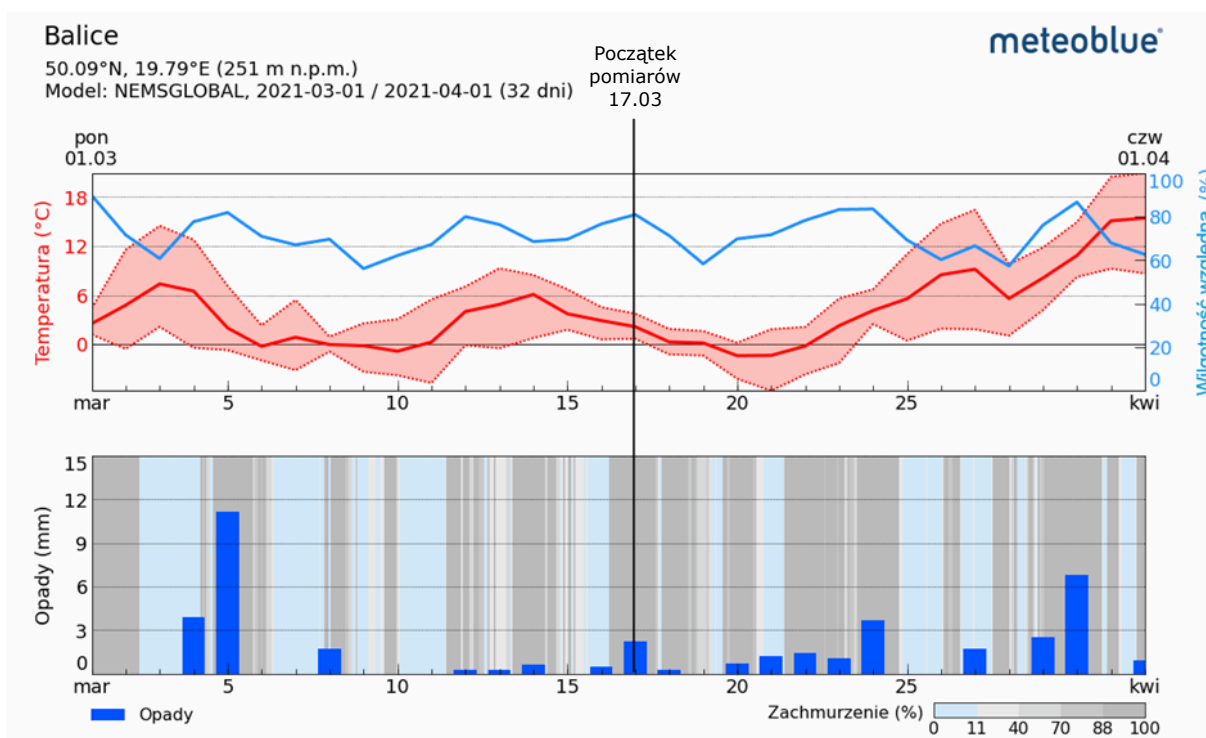


**Rys. 34.** Lokalizacja punktów pomiarowych: 1. Balice, ul. Na Lotnisko; 2. Kraków, ul. Bulwarowa. Źródła punktowe: A. Międzynarodowy Port Lotniczy Kraków-Balice; B. ArcelorMittal Poland; C. Ekospalarnia Kraków; D. Elektrociepłownia Kraków  
Źródło: [www.mapa.targeo.pl]

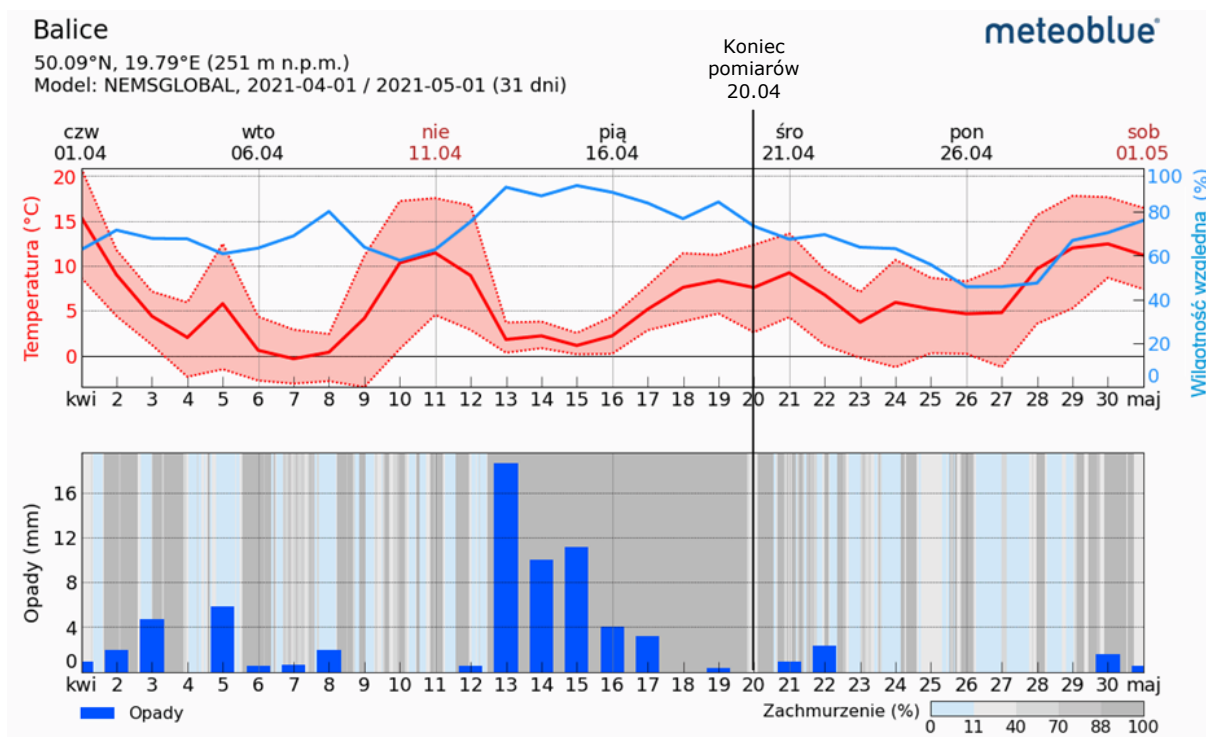
### 3.4. Dane meteorologiczne

W czasie pomiarów metodą automatyczną w pobliżu Portu Lotniczego w Balicach były zbierane dane meteorologiczne z pobliskiej stacji (za pośrednictwem portalu *Meteoblue*): wilgotność powietrza, zachmurzenie,

temperatura, prędkość i kierunek wiatru oraz opady deszczu. Wartości meteorologiczne zostały przedstawione na rysunku 35 (17 marca 2021 r. - 1 kwietnia 2021 r.) oraz rysunku 36 (1–20 kwietnia 2021 r.), natomiast pełne godzinowe dane meteorologiczne przedstawiono w załączniku 1. Temperatura w czasie pomiarów oscylowała w przedziale 0,7°C - 21,8°C, co odzwierciedlało zmienność warunków termicznych w badanym okresie, przy wilgotności względnej powietrza w przedziale od 31% do 94%. Wartości ciśnienie atmosferycznego kształtowały się w przedziale 1001,3-1030,8 hPa. Istotnym spostrzeżeniem był brak opadów przez 17 dni. W przypadku dni z opadami tylko w jednym dniu osiągnęły wartość 1,7 mm, natomiast w pozostałe nie przekraczały 0,5 mm. Zachmurzenie powietrza wahało się od 0% do 100%.



**Rys. 35.** Archiwum pogodowe w czasie kampanii pomiarowej w Balicach w 2021 r. z zaznaczonym początkiem pomiarów  
 Źródło: [www.meteoblue.pl]

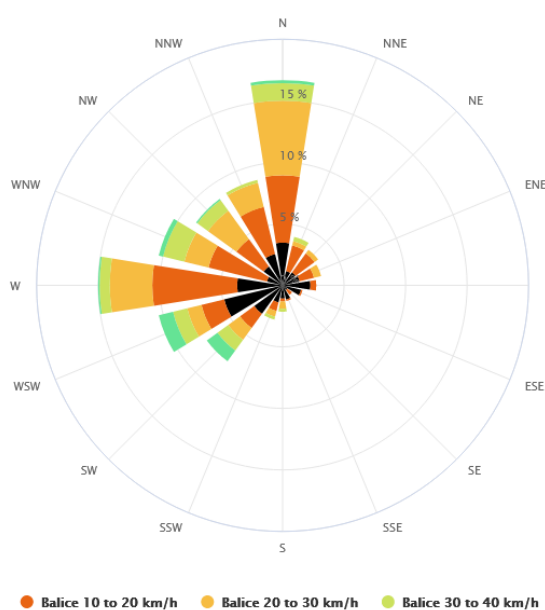


**Rys. 36.** Archiwum pogodowe w czasie kampanii pomiarowej w Balicach w 2021 r. z zaznaczonym końcem pomiarów  
Źródło: [www.meteoblue.pl]

W czasie prowadzonych pomiarów zaobserwowano zmienne warunki meteorologiczne. Różnica temperatur między najmniejszą a największą wyniosła 21,1°C. Przez 16 dni pomiarowych wystąpiło całkowite zachmurzenie. Warto podkreślić, że wysokie poziomy zachmurzenia mogły wpływać na koncentrację zanieczyszczeń w atmosferze poprzez hamowanie procesów dyspersji i wymiany powietrza, co zwiększało ryzyko pogorszenia jego jakości [Eck i in. 2020]. Wyż baryczny stabilizował warunki atmosferyczne i skutkowało to pogorszeniem jakości powietrza. Niż zaś powodował bardziej niestabilne warunki i szybsze ruchy mas powietrza, co wpływało na niskie stężenie pyłów [Kosiński 1961]. Niski stopień opadów również utrudniał procesy samooczyszczania powietrza [Godłowska 2019]. Obserwacje meteorologiczne dostarczyły cennych danych naukowych, a także miały istotne znaczenie dla oceny jakości powietrza i dla podejmowania działań zaradczych w celu ochrony środowiska.

Ponadto na podstawie analizy kierunków i prędkości wiatru na wysokości 10 m, obserwowanych w trakcie prowadzenia pomiarów przedstawiono różę wiatru (rysunek 37). Z analizy wykresu wynika, że miejsce prowadzenia pomiarów było przeważnie usytuowane pod wiatr wiejący z kierunku zachodniego. Większość (35,7%) wszystkich zarejestrowanych kierunków wiatru stanowił wiatr zachodni

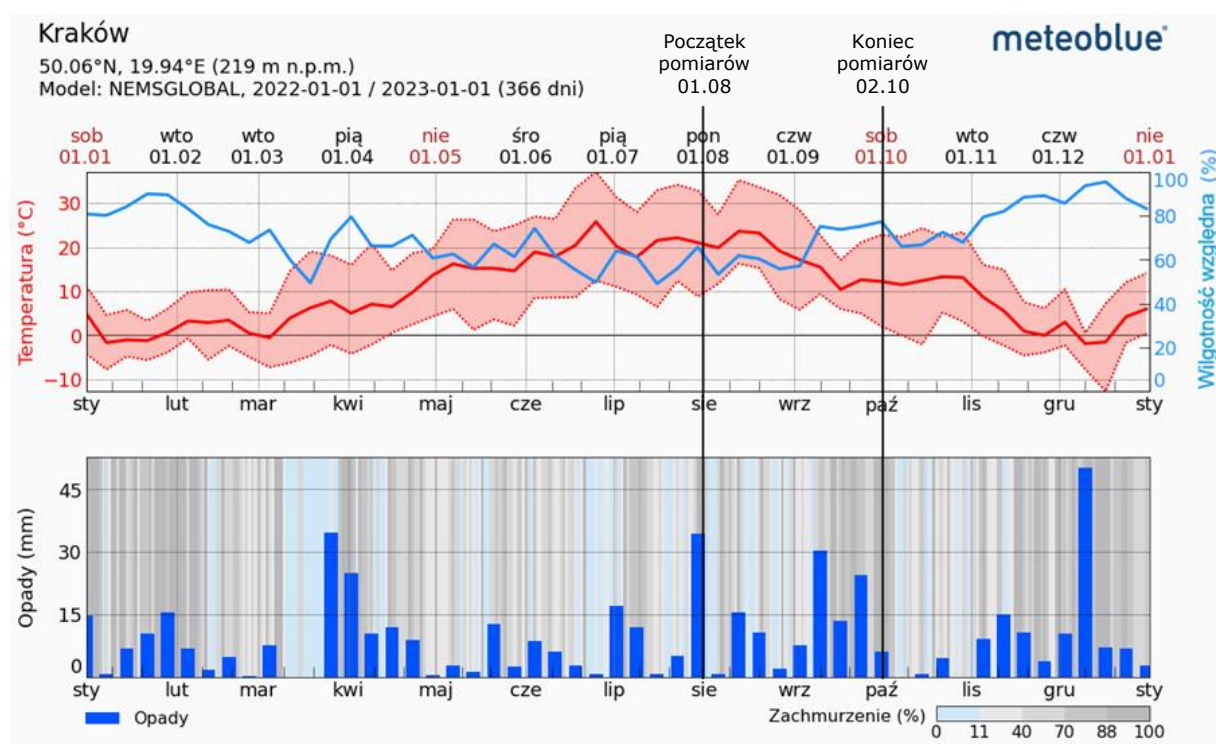
(W, WSW i WNW). Kolejną grupą to wiatr północny (N, NNE, NNW) z wynikiem 29,5%, północno-zachodni (NW) stanowiący 8,7%, wschodni (E, ENE, ESE) oraz południowo-zachodni (SW): po 7,6%, południowy (S, SSE, SSW) stanowiący 6,3%, północno-wschodni (NE) z wynikiem 3,6% oraz południowo-wschodni 1%. W większości zarejestrowany wiatr miał prędkość od 10 km/h do 20 km/h, stanowiąc 34,6% wszystkich przypadków. Wiatr o prędkości do 10 km/h stanowił 32,6%, o prędkości od 20 do 30 km/h stanowił 21,2%, podczas gdy ten o prędkości od 30 km/h do 40 km/h: 8,5%. Najmniejszy udział miał wiatr o prędkości od 40 do 50 km/h: 3,1%.



**Rys. 37.** Róża wiatru w dni pomiarowe w miejscu pomiarowym Balice  
 Źródło: opracowano na podstawie [www.meteoblue.pl]

Dane wykazywały dominujące kierunki wiatru zachodnie i północne. Wskazywały na przemieszczanie się zanieczyszczeń z Portu Lotniczego w kierunku punktu pomiarowego, a przy tym w kierunku Krakowa. Wiatr o prędkości od 10 do 20 km/h, który stanowił największy procent zarejestrowanych wyników, sprzyjał równomiernemu rozprzestrzenianiu się zanieczyszczeń, podczas gdy wiatr o prędkości do 10 km/h powodował większą lokalną koncentrację pyłu PM<sub>2,5</sub>. Z kolei wyższe prędkości wiatru (20-50 km/h) przyczyniały się do szybszego transportu zanieczyszczeń na większe odległości, co wpłynęło na zmniejszenie poziomu zanieczyszczeń w badanym obszarze. Analiza ta podkreśla znaczenie monitorowania kierunku i prędkości wiatru jako kluczowych parametrów w ocenie jakości powietrza i planowaniu działań prewencyjnych [Wierzińska, Szczepaniak 2021].

W przypadku pomiarów metodą grawimetryczną (Kraków, ul. Bulwarowa) pozyskano za pośrednictwem portalu *Meteoblue* dane meteorologiczne: wilgotność powietrza, zachmurzenie, temperatura, prędkość i kierunek wiatru oraz opady deszczu. Dane meteorologiczne przedstawiono na rysunku 38, a pełne dane 24-godzinne zostały umieszczone w załączniku 2. Temperatura w czasie pomiarów oscylowała w przedziale 9,5°C do 28,3°C, co odzwierciedlało zmienność warunków termicznych w badanym okresie. Zachmurzenie powietrza wahało się od 0,2% do 100%, przy czym przez 34 dni zachmurzenie wynosiło powyżej 50%. Ciśnienie atmosferyczne zmieniało się w przedziale od 999,3 hPa do 1023,9 hPa. Wilgotność względna powietrza oscylowała między 31,0% a 89,4%. Warto dodać, że w czasie pomiarów średnia ilość opadów deszczu wyniosła 1,7 mm.

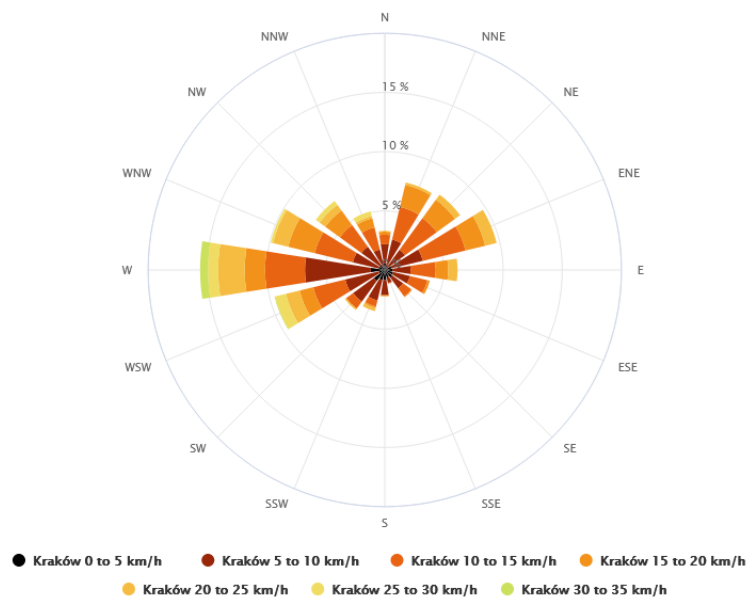


**Rys. 38.** Archiwum pogodowe z zaznaczoną kampanią pomiarową w Krakowie, ul. Bulwarowa w 2022 r.  
Źródło: [www.meteoblue.pl]

W analizowanym okresie zaobserwowano zmienność warunków mikroklimatycznych. Różnica temperatur między najmniejszą a największą wyniosła 18,8°C. Podczas antycyklonów, często w obecności klina wyżu, w warunkach inwersji temperaturowej dochodzi do epizodów wysokich stężeń zanieczyszczeń. W tych warunkach warstwa chłodniejszego powietrza, która znajduje się pod warstwą ciepłego powietrza, utrudnia pionowe mieszanie mas i zmniejsza stopień dyspersji zanieczyszczeń [Godłowska 2019]. W ogólnym ujęciu

wyż baryczny sprzyjał stabilności atmosfery i mógł powodować zwiększenie stopnia zanieczyszczenia jej dolnych warstw. Podczas niżu obserwowano większą turbulencję, czego wynikiem było naturalne oczyszczenie powietrza [Kosiński 1961]. Zachmurzenie natomiast przez większość czasu osiągnęło wartość powyżej 50%. Szczególnie wysoki stopień zachmurzenia wpłynął na przemieszczanie się transgranicznych zanieczyszczeń do aglomeracji krakowskiej oraz łączenie się z lokalnymi zanieczyszczeniami, co powodowało wyższe stężenie pyłów zawieszonych PM<sub>2,5</sub> [Eck i in. 2020]. Natomiast opady deszczu wpłynęły na zmniejszenie stężenia zanieczyszczeń za sprawą procesów rozpuszczania ich w wodzie, jednak czasem nawet pomimo opadów, stężenia mogą pozostać na wysokim poziomie, szczególnie w warunkach utrudnionego mieszania powietrza w warunkach inwersyjnych [Godłowska 2019]. Wzrost wilgotności względnej powietrza może wpływać na zmniejszenie stopnia zanieczyszczenia pyłami zawieszonymi, szczególnie że powoduje agregację pyłów, która prowadzi do zwiększenia ich masy oraz opadu na powierzchnię terenu [Parlińska, Pomichowski 2018; Wierzińska, Szczepaniak 2021].

Na podstawie analizy kierunków i prędkości wiatru na wysokości 10 m, zaobserwowanych w trakcie prowadzenia pomiarów, przedstawiono różę wiatru (rysunek 39), a pełne dane zostały umieszczone w załączniku 2. Z analizy wykresu wynika, że miejsce prowadzenia pomiarów było często usytuowane pod wiatr z kierunku zachodniego. Średnia dobowa prędkość wiatru wahała się od 4,8 km/h do 25 km/h. Największą grupę stanowił wiatr zachodni (W, WSW, WNW) z wynikiem 35,1%. Kolejne grupy to wiatr wschodni (E, ENE, ESE): 19,8%, północny (N, NNE, NNW): 10%, północno-wschodni (NE) stanowiący 7,9%, południowy (S, SSE, SSW) stanowiący 7%, południowo-zachodni (SW): 7,2% oraz południowo-wschodni (SE): 2,8%. Większość zarejestrowanych ruchów powietrza miała prędkość od 5 do 10 km/h, stanowiąc 32,5% wszystkich przypadków. Następnie wiatr o prędkości 10-15 km/h stanowił 30,2%. Wiatr o prędkości od 5 km/h do 10,4%, podczas gdy ten o prędkości 15-20 km/h stanowił 14,8%. Mniejszy udział miał wiatr o prędkości od 20-25 km/h (8,6%), 25-30 km/h (2,8%) oraz od 30-35 km/h (0,7%).



**Rys. 39.** Róża wiatru w dni pomiarowe w miejscu pomiarowym Kraków  
 Źródło: opracowano na podstawie [www.meteoblue.pl]

Zebrane dane wskazują, że zmienne kierunki wiatru i jego prędkości sprzyjają przemieszczaniu się zanieczyszczeń ku punktowi pomiarowemu. Wiatr północny i północno-zachodni transportował zanieczyszczenia z Elektrociepłowni. Wiatr wschodni natomiast przynosił zanieczyszczenia z Ekospalarni oraz Zakładu ArcelorMittal. Inne zanieczyszczenia napływające z zachodu, w tym z Portu Lotniczego, również znalazły odzwierciedlenie w analizie ilościowej i jakościowej. Wiatr o prędkości od 5 do 10 km/h, który stanowił największy procent zarejestrowanych wartości, sprzyja równomiernemu rozprzestrzenianiu się tych zanieczyszczeń. Wiatr o prędkości od 0 do 5 km/h (10,4%) prowadzi do większej lokalnej koncentracji PM<sub>2,5</sub>, co jest istotne w kontekście bliskiej odległości zakładów przemysłowych. Natomiast wyższe prędkości wiatru (20-35 km/h) przyczyniają się do szybszej dyspersji zanieczyszczeń w środowisku [Wierzińska, Szczepaniak 2021]. Dane meteorologiczne stanowią cenne informacje naukowe. Istotne jest zatem zrozumienie, rejestrowanie i śledzenie zmian warunków mikroklimatycznych w celu skutecznego zarządzania jakością powietrza.

### **3.5. Wyniki własnych pomiarów pyłów**

#### **Metoda pomiarowa automatyczna**

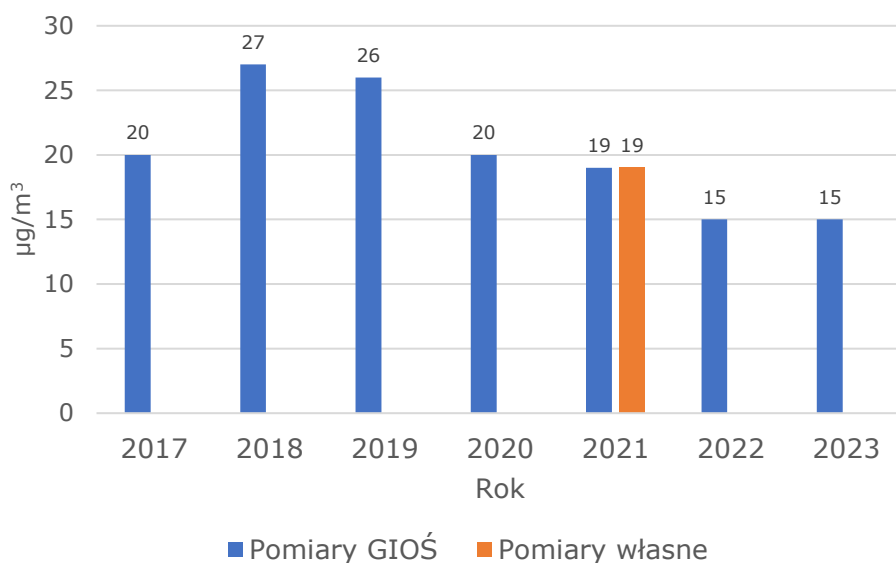
W okresie od 17 marca 2021 r. do 20 kwietnia 2021 r. między godziną 12:00, a 13:00 najwyższe stężenie godzinowe pyłów PM<sub>2,5</sub> o wartości 40 µg/m<sup>3</sup> zarejestrowano 26 marca 2021 roku, najmniejsze zaś 11 kwietnia, o wartości 5 µg/m<sup>3</sup>. Na jakość powietrza wpływały różne parametry: jednym z nich była zmienność warunków mikroklimatycznych, w tym prędkość i kierunek wiatru. Kolejnym czynnikiem była działalność związana z infrastrukturą transportową, z ruchem lotniczym w Porcie Lotniczym oraz z ruchem drogowym na pobliskich szlakach komunikacyjnych (Autostrada A4 oraz droga wojewódzka nr 775). Ponadto działalność przemysłowa oraz ograniczenia związane z okresem pandemicznym przyczyniały się do zmian wartości stężeń.

Zgodnie z nowymi wytycznymi WHO średnie 24-godzinne stężenie PM<sub>2,5</sub> nie powinno przekraczać 15 µg/m<sup>3</sup>.

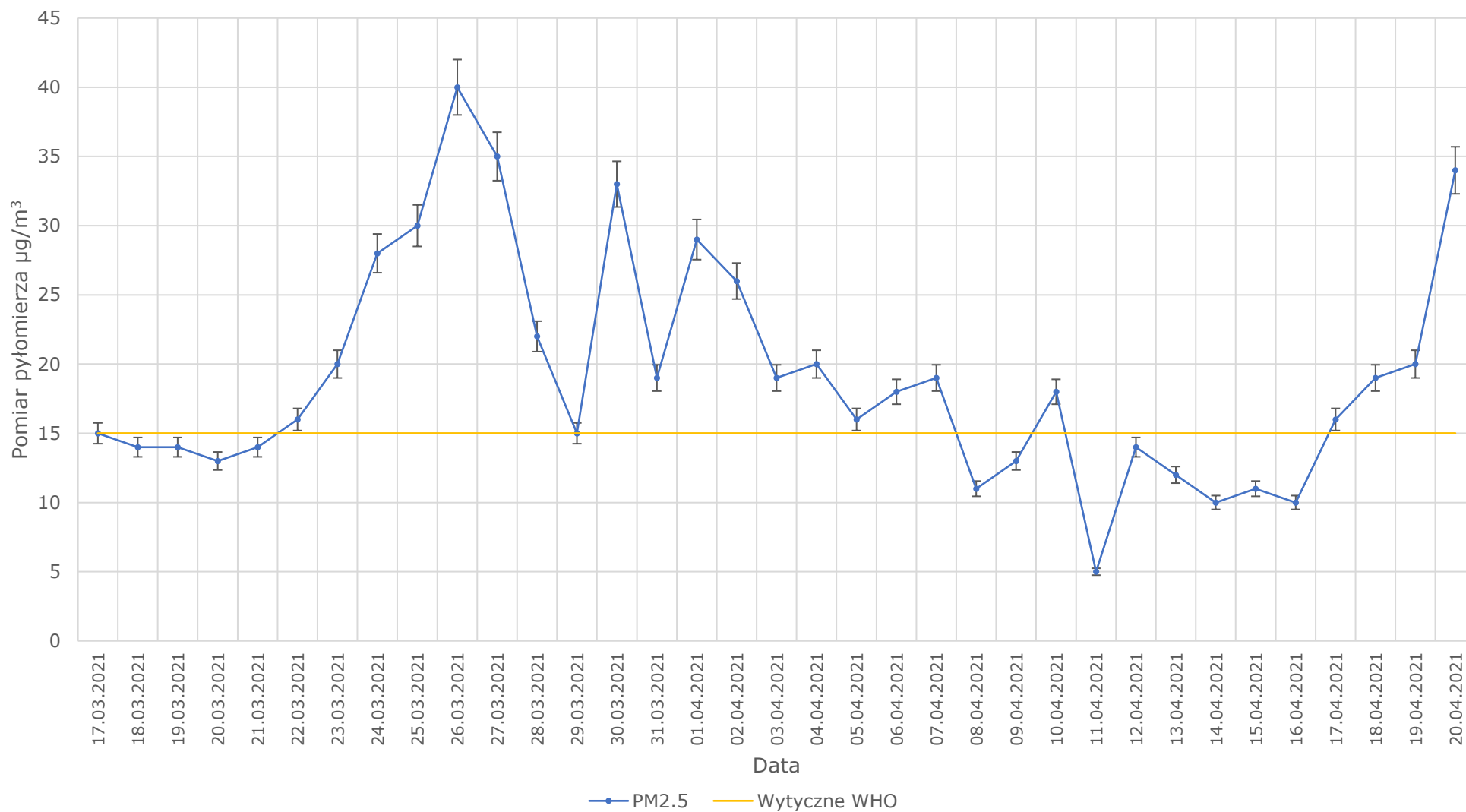
Wykres z wynikami pomiarowymi PM<sub>2,5</sub> w Balicach przedstawiono na rysunku 41, a wartości zamieszczono w załączniku 3.

Porównując średnie wartości danych pomiarowych Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska (GIOŚ) dla godziny 12.00, w okresie od 17 marca do 20 kwietnia w latach 2017–2023, zaobserwowano pewne zależności (rysunek 40). W 2017 roku wartość PM<sub>2,5</sub> wyniosła 20 µg/m<sup>3</sup>, a w następnym roku nastąpił wzrost do 27 µg/m<sup>3</sup>. W kolejnych latach odnotowano tendencję spadkową wartości, która wyniosła 26 µg/m<sup>3</sup> w 2019 roku, 20 µg/m<sup>3</sup> w 2020 roku, 19 µg/m<sup>3</sup> w 2021 roku, a następnie 15 µg/m<sup>3</sup> w 2022 i 2023 roku. W 2020 roku, pierwszym roku pandemii, średnia wartość PM<sub>2,5</sub> wyniosła 20 µg/m<sup>3</sup>, co pokazało spadek w porównaniu do dwóch poprzednich lat. Porównanie własnych pomiarów z danymi GIOŚ dla średniej w 2021 roku, równej 19 µg/m<sup>3</sup>, wykazało zgodność wyników oraz potwierdziło wiarygodność prowadzonych badań. Wyniki od 2017 roku do 2021 roku oraz w 2023 roku zostały wykonane metodą automatyczną na stacji komunikacyjnej, Kraków, Aleja Krasińskiego (kod międzynarodowy stacji: PL0012A) o współrzędnych 50,057678 N i 19,926189 E, oddalonej o 8,7 km od punktu pomiarowego nr 1. Z uwagi na brak pomiarów w 2022 r. na tej stacji, wzięto pod uwagę wyniki automatyczne ze stacji typu przemysłowego w Krakowie,

ul. Bulwarowa (kod międzynarodowy stacji: PL0039A) o współrzędnych 50,069308 N i 20,053492 E, oddalonej o 17,5 km od punktu pomiarowego nr 1.



**Rys. 40.** Średnie godzinowe wartości danych pomiarowych GIOŚ oraz własne dla okresu od 17 marca do 20 kwietnia w latach 2017–2023 (godzina 12.00)  
Źródło: opracowano na podstawie [[www.powietrze.gios.gov.pl/bank\\_danych](http://www.powietrze.gios.gov.pl/bank_danych)]



**Rys. 41.** Wykres pomiarów pyłów PM2,5 w dniach pomiarowych. Miejsce pomiarowe: Port Lotniczy Kraków-Balice  
 Źródło: opracowanie własne

## Metoda pomiarowa grawimetryczna (manualna)

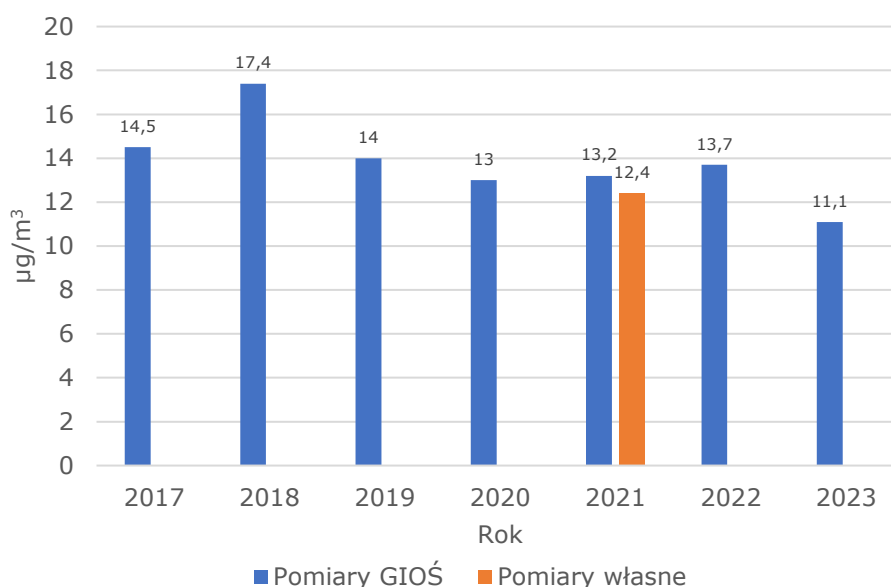
W okresie od 1 sierpnia 2022 r. do 2 października 2022 r. zostały wyliczone stężenia 24-godzinne pyłów PM<sub>2,5</sub>. Najwyższe stężenie zarejestrowano 26 września 2022 r., równe 24,2 µg/m<sup>3</sup>, najmniejsze natomiast 2 października 2022 r. o wartości 4,7 µg/m<sup>3</sup>. Na stężenie zanieczyszczeń w rejonie ul. Bulwarowej w Krakowie wpływ miały: zmienność czynników mikroklimatycznych, w szczególności prędkość i kierunek wiatru, oraz pobliskie obiekty przemysłowe (Zakład ArcelorMittal, Ekospalarnia Kraków, Elektrociepłownia Kraków). Ruch drogowy również przyczynił się do zwiększenia stężenia pyłów zawieszonych, w związku z pobliskim położeniem drogi krajowej nr 79 oraz drogi ekspresowej S7. W analizowanym okresie średnia wartość w dni robocze (od poniedziałku do piątku) wyniosła 12,9 µg/m<sup>3</sup>, podczas gdy w niedzielę wyniosła 9 µg/m<sup>3</sup>. Wyraźne niższe wartości stężeń w dni wolne od pracy wiązały się ze zmniejszonym ruchem komunikacyjnym i ograniczoną działalnością przemysłową. Istotny wpływ działalności antropogenicznej na jakość powietrza został wykazany przez zaobserwowaną tendencję zmiany stężenia pyłów.

Zgodnie z wytycznymi WHO średnie 24-godzinne stężenie PM<sub>2,5</sub> nie powinno przekraczać 15 µg/m<sup>3</sup>, natomiast w okresie pomiarowym zostało przekroczone 15 razy.

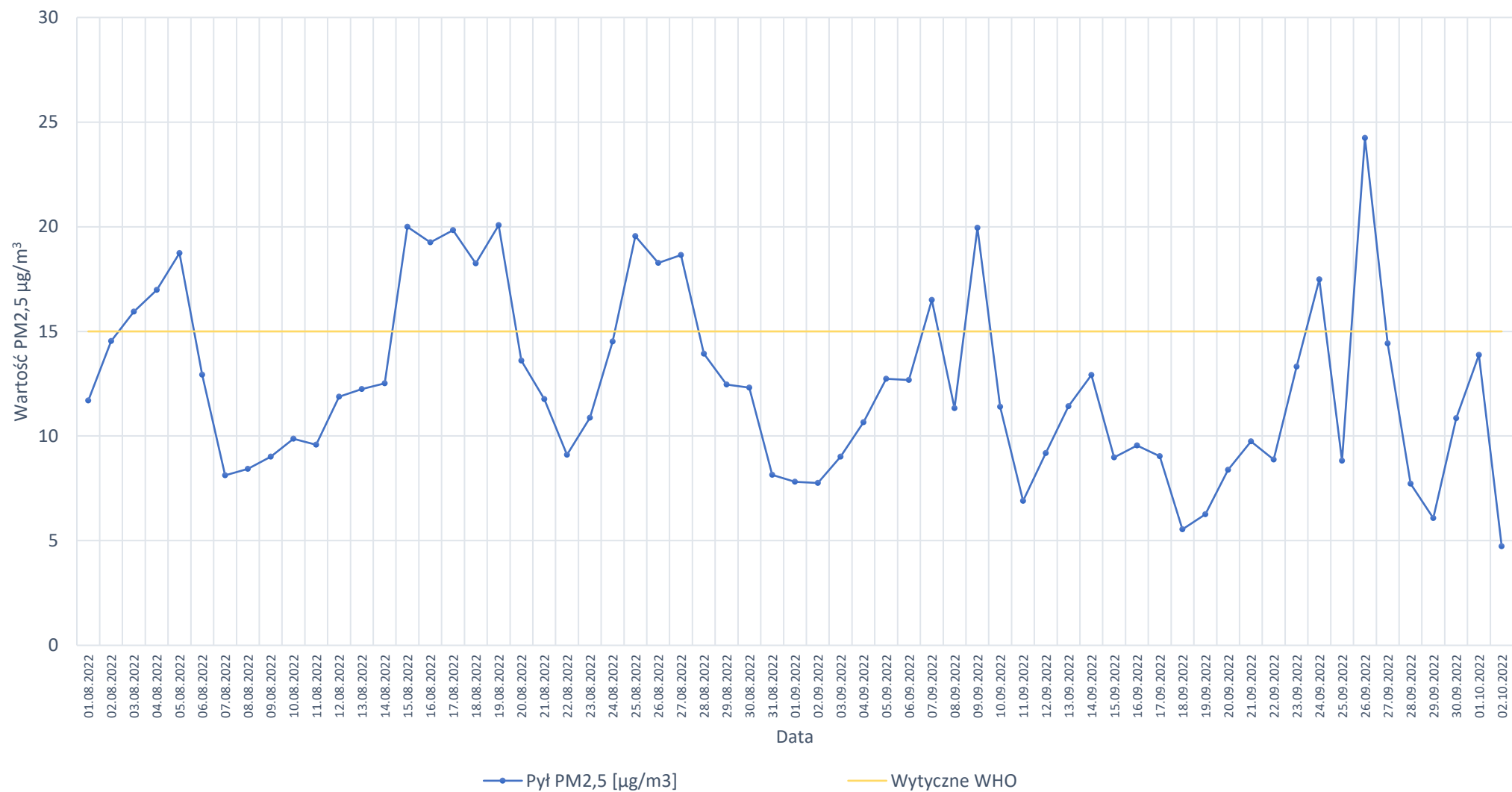
Wykres z wynikami pomiarowymi PM<sub>2,5</sub> w Krakowie, ul. Bulwarowa przedstawiono na rysunku 43, a dokładne wartości mas filtrów przed ekspozycją i po niej wraz z wyliczonymi stężeniami zostały przedstawione w załączniku 4.

Dla badanego okresu (od 1 sierpnia 2022 r. do 2 października 2022 r.) w poszczególnych latach od 2017 do 2023 porównano średnie dobowe wartości danych pomiarowych GIOŚ przedstawione na rysunku 42. W 2017 roku wartość wyniosła 14,5 µg/m<sup>3</sup>, po czym w kolejnym roku wartość wzrosła do 17,4 µg/m<sup>3</sup>. W kolejnych latach wartości miały tendencję spadkową. Poprzez porównanie własnych pomiarów ze średnią dobową wykonaną przez GIOŚ, równą 12,4 µg/m<sup>3</sup>, wykazano różnicę 0,8 µg/m<sup>3</sup>. Wyniki od 2017 roku do 2019 roku oraz w 2023 roku zostały wykonane metodą manualną na stacji tła miejskiego, Kraków, ul. Bujaka (kod międzynarodowy stacji: PL0501A), o współrzędnych 50,010575 N i 19,949189 E, oddalonej o 9,9 km od punktu pomiarowego nr 2. Natomiast w latach 2020-2022 w analizie uwzględniono wyniki metodą manualną ze stacji tła miejskiego, Kraków, os. Piastów (kod międzynarodowy stacji: PL0642A),

o współrzędnych 50,098508 N i 20,018269 E, oddalonej o 4,1 km od punktu pomiarowego nr 2. Warto zauważyć, że w latach 2020 i 2021, w okresie pandemii COVID-19, zaobserwowano stabilizację i spadek stężenia PM<sub>2,5</sub>, co mogło być wynikiem zmniejszonej aktywności przemysłowej. W 2023 roku został zaobserwowany dalszy spadek średniej wartości stężenia PM<sub>2,5</sub> do 11,1 µg/m<sup>3</sup>, co stanowiło najniższą wartość w analizowanym okresie.



**Rys. 42.** Średnie dobowe wartości danych pomiarowych GIOŚ oraz własne dla analizowanego okresu od 1 sierpnia 2022 r. do 2 października 2022 r.  
Źródło: opracowano na podstawie [[www.powietrze.gios.gov.pl/bank\\_danych](http://www.powietrze.gios.gov.pl/bank_danych)]



**Rys. 43.** Wykres pomiarów pyłów PM<sub>2,5</sub> w dniach pomiarowych. Miejsce pomiarowe: Kraków ul. Bulwarowa  
 Źródło: opracowanie własne

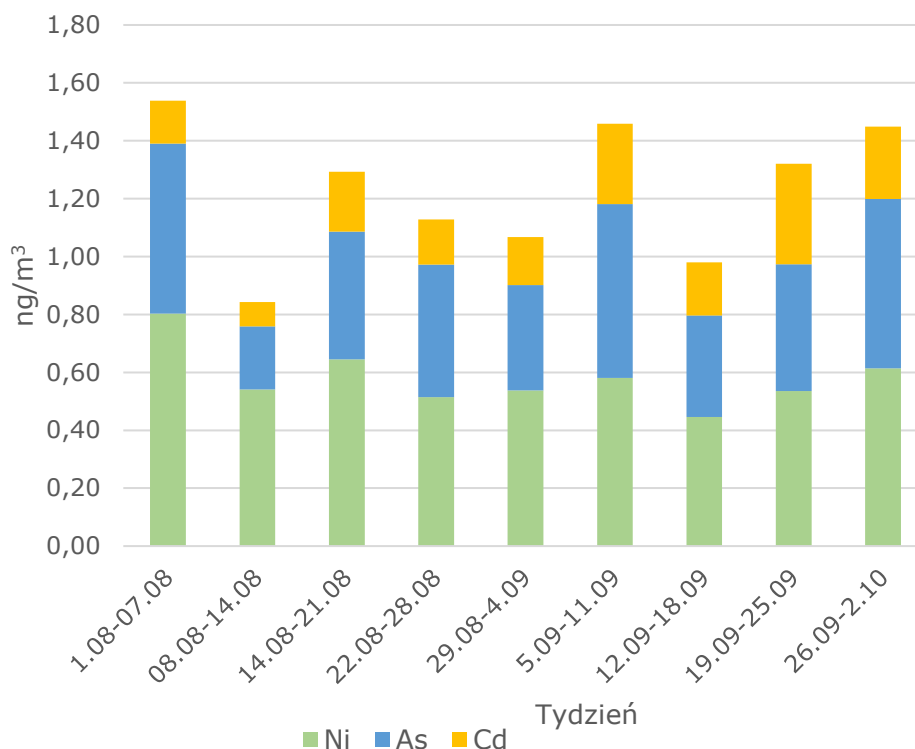
### 3.6. Oznaczenie metali ciężkich w próbkach pyłów

Oznaczenie metali w próbkach pyłu PM<sub>2,5</sub> z użyciem spektrometru emisyjnego atomowego z plazmą argonową wzbudzaną indukcyjnie – *ICP AES 4200* wykazało, że w pyle zawarte były pierwiastki: nikiel, arsen, kadm i ołów. Każda z próbek została poddana trzykrotnej analizie w celu zapewnienia wiarygodnych wyników. Pełne wyniki w I, II oraz III pomiarze umieszczono w załączniku 8 do pracy. Wyniki zostały przedstawione jako średnia arytmetyczna z trzech oznaczeń metali dla dziewięciu kolejnych tygodni w okresie 1 sierpnia – 2 października 2022 roku. Na rysunku 44 została zilustrowana zmienność stężenia niklu (Ni), arsenu (As) oraz kadmu (Cd) w pyle PM<sub>2,5</sub>. Najwyższe stężenie niklu zarejestrowano w pierwszym tygodniu pomiarowym (1.08-07.08), kiedy to wartość wyniosła 0,84 ng/m<sup>3</sup>. Najwyższą wartość arsenu wyniosła 0,60 ng/m<sup>3</sup> i została zanotowana w szóstym tygodniu pomiarowym (5.09-11.09), podczas gdy najwyższe stężenie kadmu odnotowano w przedostatnim tygodniu (19.09-25.09) równe 0,35 ng/m<sup>3</sup>. Największa ogólna wartość zanieczyszczeń w pierwszym tygodniu związana była ze stabilnymi warunkami atmosferycznymi, małą ilością opadów deszczu (0,2 mm) przez cały tydzień. W kolejnym tygodniu natomiast nastąpił spadek zanieczyszczeń w powietrzu, wywołany zmiennymi warunkami mikroklimatycznymi – większa prędkość wiatru (średnia dzienna powyżej 10 km/h) oraz obfite opady deszczu (12 mm) pod koniec drugiego tygodnia (załącznik 5). Największą zmienność stężeń wykazał arsen: różnica pomiędzy najwyższą a najniższą zarejestrowaną wartością wyniosła 0,38 ng/m<sup>3</sup>. Ponadto w drugiej połowie września (ósmy tydzień) zaobserwowano nagły wzrost stężeń, w szczególności kadmu, z maksymalną wartością równą 0,35 ng/m<sup>3</sup>, co wskazywało na zwiększone lokalne źródła emisji. W przypadku poszczególnych pierwiastków:

- Nikiel stosowany jest w przemyśle w produkcji stopów żelaznych i nieżelaznych oraz powłok ochronnych. Pierwiastek ten jest nieodłącznym elementem działalności zakładów przemysłowych, takich jak ArcelorMittal, gdzie wykorzystuje się go w procesach metalurgicznych i produkcji stali nierdzewnej. Pyły niklu wchłonięte przez organizm powodują poważne problemy zdrowotne, takich jak choroby układu oddechowego i zaburzenia układu immunologicznego [Surgiewicz 2021];

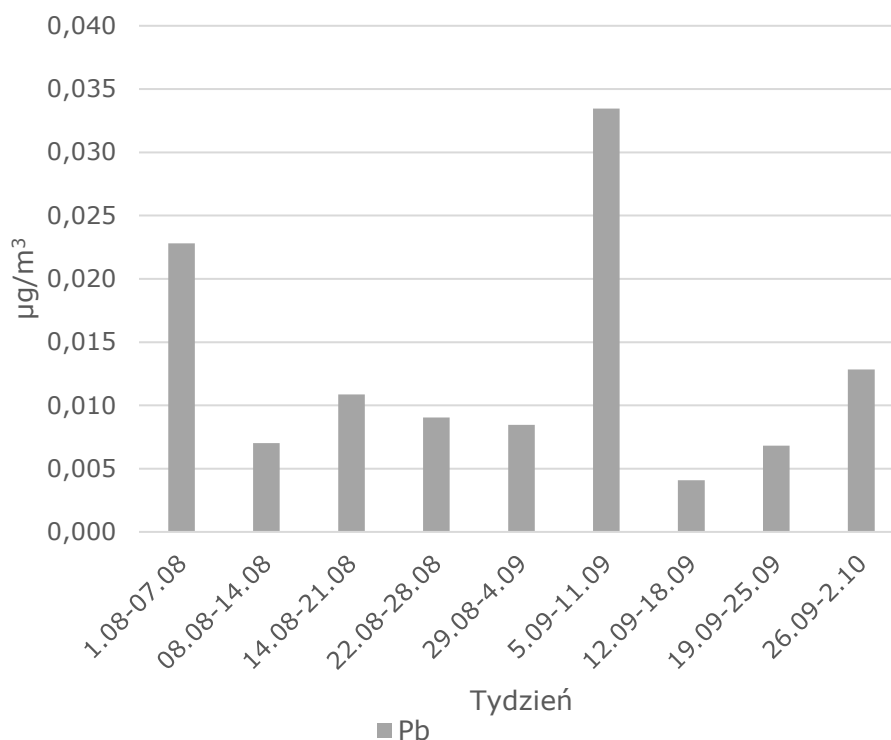
- Arsen jest emitowany w hutnictwie miedzi (aż 50% antropogenicznej emisji do środowiska), również w Zakładzie ArcelorMittal. Znaczący udział w emisjach ma spalanie węgla, zwłaszcza niskiej jakości węgla brunatnego (20%), a także przetwórstwo metali kolorowych (10%). W Ekospalarni Kraków istnieje ryzyko uwalniania arsenu, szczególnie w przypadku drewna impregnowanego. Z uwagi na wykorzystywanie węgla w Elektrociepłowni Kraków, mogło to przyczynić się do zmiany emisji w powietrzu. Cząstki arsenu są szczególnie niebezpieczne, gdyż łatwo przenikają go krwioobieg, powodując wiele problemów zdrowotnych, zaburzeń układu krążenia i układu immunologicznego [Bukowski, Woźniak 2018; Skoczyńska 2018];
- Kadm jest wykorzystywany w przemyśle, m.in. do produkcji barwników, stabilizatorów tworzyw sztucznych oraz powłok galwanicznych. Jego obecność w powietrzu związana jest z produkcją blachy w Zakładzie ArcelorMittal, gdzie stosowane są zaawansowane procesy metalurgiczne. Stwarza to poważne zagrożenie dla zdrowia ludzi, zwierząt oraz roślin, z uwagi na jego łatwą akumulację w środowisku [Czeczot, Majewska-Wierzbicka 2010].

Warto podkreślić, że w przypadku Zakładu ArcelorMittal w decyzji pozwolenia zintegrowanego z dnia 26 października 2021 nie ma wyszczególnionego dopuszczalnego poziomu dla arsenu oraz kadmu, pomimo tego, że w obiektach zajmujących się produkcją stali oraz blachy dochodzi do ich emisji. Brak sprecyzowanych norm może zwiększać niekontrolowaną emisję szkodliwych pierwiastków, dlatego konieczne jest włączenie arsenu i kadmu w treść dokumentu. W przypadku Elektrociepłowni Kraków w pozwoleniu zintegrowanym z dnia 12 września 2023 roku brak jest informacji o dopuszczalnym poziomie emisji arsenu, który również może być emitowany podczas spalania węgla do produkcji energii elektrycznej oraz ciepłej.



**Rys. 44.** Stężenie niklu (Ni), arsenu (As) i kadmu (Cd) w poszczególnych tygodniach w okresie od 1 sierpnia 2022 r. do 2 października 2022 r.  
Źródło: opracowanie własne

Stężenie ołowiu w analizowanym okresie przedstawiono na rysunku 45. Z uwagi na normy i standardy stężenie ołowiu przedstawiono w jednostce  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Najwyższe stężenie tego pierwiastka zostało odnotowane w tygodniu 5–11 września i wyniosło  $0,033 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Szczególnie w tym okresie wartość stężenia była znacznie wyższa niż w pozostałych tygodniach. Najniższe stężenie zarejestrowano w okresie od 12 września do 18 września, równe  $0,004 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Tak nagły spadek związany był ze zmiennością warunków atmosferycznych (zmiana kierunku wiatru), a także zmniejszoną emisją tego pierwiastka. Wahania stężeń ołowiu w analizowanym okresie, bez wyraźnego trendu wzrostowego lub spadkowego, zostały zinterpretowane jako wynik zmiennych warunków atmosferycznych oraz różnorodnych źródeł emisji. Ołów jako ciężki metal powszechnie wykorzystywany jest w przemyśle hutniczym, motoryzacyjnym, w produkcji farb, ceramiki oraz akumulatorów. Narażenie na ten pierwiastek może prowadzić do poważnych uszkodzeń układów nerwowego, krwionośnego, krwiotwórczego, rozrodczego, a także nerek i wątroby [Bukowski, Woźniak 2018; Labudda 2013].



**Rys. 45.** Stężenie ołowiu (Pb) w poszczególnych tygodniach w okresie od 1 sierpnia 2022 r. do 2 października 2022 r.  
Źródło: opracowanie własne

Przeprowadzona analiza zawartości metali ciężkich w próbkach pyłu zawieszonego PM<sub>2,5</sub> wykazała wahania koncentracji tych pierwiastków w analizowanym okresie w pobliżu źródeł punktowych. Najwyższe stężenie niklu odnotowano w pierwszym tygodniu pomiarowym (1.08-07.08), arsenu w szóstym tygodniu (5.09-11.09), a kadmu w ósmym tygodniu (19.09-25.09). Wyniki te wskazują na okresowe nasilenie emisji związanych z działalnością przemysłową. Istotne wahania stężeń, szczególnie w przypadku ołowiu, były ściśle powiązane ze zmiennymi warunkami mikroklimatycznymi. Toteż podkreśla się znaczenie ciągłego monitorowania i ścisłej kontroli emisji. Brak określonych dopuszczalnych poziomów arsenu i kadmu w pozwoleniu zintegrowanym dotyczącym Zakładu ArcelorMittal, a także arsenu w pozwoleniu zintegrowanym dotyczącym Elektrociepłowni Kraków, wskazał na konieczność aktualizacji regulacji, aby zapobiec niekontrolowanej emisji tych toksycznych substancji, a przy tym zminimalizować ich negatywny wpływ na zdrowie i środowisko.

## 3.7. Analiza statystyczna pomiarów metodą grawimetryczną

### Metody statystyczne

Obliczenia zostały przeprowadzone przy użyciu środowiska statystycznego *IBM SPSS Statistics*, wersja 29.0.2.0 (20) oraz pakietu *MS Office 2019*. W analizie danych opracowano następujące parametry [Sobczyk 2007]:

- miary tendencji centralnej: średnia arytmetyczna;
- miary rozproszenia: odchylenie standardowe, współczynnik zmienności (*CV*);
- miary asymetrii: skośność, kurtoza;
- zależność między zmiennymi: korelacja liniowa Pearsona ( $r_{xy}$ ).

Regresja liniowa wielokrotna posłużyła do oceny relacji między jedną zmienną zależną a kilkoma zmiennymi niezależnymi (predyktorami). Każda zmienna niezależna w modelu jest związana ze zmienną zależną, co świadczy o liniowości. W wielokrotnej regresji ważnym elementem jest obliczenie współczynnika determinacji  $R^2$  na podstawie wzoru (19), który wyjaśnia, jaka część zmienności zmiennej zależnej jest wyjaśniana przez model. Współczynnik  $R^2$  przyjmuje wartość od 0 do 1. Wartości powyżej 0,9 są uznawane za bardzo dobre, powyżej 0,8 za dobre, powyżej 0,6 za zadowalające. Wartości poniżej 0,5 sugerują, że model wyjaśnia mniej niż 50% zmienności zmiennej zależnej, co może prowadzić do nietrafnych prognoz [Wątroba 2011; [www.ibm.pl/wielokrotna\\_regresja](http://www.ibm.pl/wielokrotna_regresja); [www.mfiles.pl/wspolczynnik\\_determinacji](http://www.mfiles.pl/wspolczynnik_determinacji)].

$$R^2 = \frac{\sum_{t=1}^n (\hat{y}_t - \bar{y})^2}{\sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})^2} \quad (19)$$

Gdzie:  $R^2$  – współczynnik determinacji;  $y_t$  – rzeczywista wartość zmiennej zależnej;  $\hat{y}_t$  – przewidywana wartość zmiennej zależnej;  $\bar{y}$  – średnia wartość rzeczywistej zmiennej zależnej.

W celu dokładniejszej oceny jakości modelu konieczne jest wyliczenie skorygowanego współczynnika  $R^2$  na podstawie wzoru (20). Wskazuje on, jaki procent wariacji w zmiennej zależnej jest wyjaśniany przez jedną lub więcej

zmiennych niezależnych. Skorygowany  $R^2$  przyjmuje wartości od  $-\infty$  do 1. Stosowany jest do porównywania dopasowania modeli ekonometrycznych o różnej liczbie zmiennych objaśniających [Gładysz, Mercik 2007; Wątroba 2011; [www.ibm.pl\\_skorygowany\\_R\\_kwadrat](http://www.ibm.pl_skorygowany_R_kwadrat)].

$$\tilde{R}^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{n - 1}{n - k} \quad (20)$$

Gdzie:  $\tilde{R}^2$  – skorygowany współczynnik determinacji;  $n$  – liczba obserwacji;  $k$  – liczba predyktorów w modelu.

Zjawisko zależności predyktorów od zmiennej zależnej można zapisać równaniem (21). Model ten stosuje się do analizy wpływu kilku zmiennych na jedną zmienną wynikową, a także do przewidywania wartości zmiennej zależnej na podstawie wartości zmiennych niezależnych. Wartość współczynnika  $\beta$  w regresji liniowej mówi o sile związku między zmienną niezależną a zmienną zależną i przyjmuje wartość od -1 do 1, z założeniem, że im bliżej 1, tym silniejszy jest związek [[www.le.ac.uk](http://www.le.ac.uk)].

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (21)$$

Gdzie:  $y$  – zmienna zależna;  $\beta_0$  – wyraz wolny (*intercept*);  $x_1, x_2, \dots, x_k$  – zmienne niezależne (predyktory);  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$  – współczynniki regresji przy zmiennych  $x_1, x_2, \dots, x_k$  określające wpływ każdej zmiennej niezależnej na  $y$ , gdy dany predyktor zmienia się o jednostkę;  $\varepsilon$  – składnik losowy reprezentujący różnicę między wartością rzeczywistą a przewidywaną.

Podstawą dla szacowania wartości istotności związku modelu regresji jest współczynnik  $t$ , który jest wynikiem testu t-Studenta. Można go wyliczyć ze wzoru (22). Współczynnik  $t$  służy do oceny, czy dany predyktor ma statystycznie istotny wpływ na zmienną zależną. Wysoka wartość bezwzględna współczynnika  $t$  oznacza, że predyktor istotnie wpływa na zmienną zależną, co może prowadzić do odrzucenia hipotezy zerowej [Wątroba 2011, Welc 2009; [www.ibm.pl/wielokrotna\\_regresja](http://www.ibm.pl/wielokrotna_regresja)].

$$t = \frac{B_k}{\delta(B_k)} \quad (22)$$

Gdzie:  $t$  – wartość współczynnika testu t-Studenta;  $B_k$  – oszacowany współczynnik regresji dla danej zmiennej niezależnej;  $\delta(B_k)$  – wartość standardowego błędu szacunku parametru strukturalnego oszacowanego dla  $k$ -tej zmiennej.

Współczynnik niestandardyzowany  $B$  natomiast jest szacowany metodą najmniejszych kwadratów. Wylicza się go ze wzoru (23). Każdy współczynnik przedstawia przewidywaną zmianę wartości zmiennej zależnej w wyniku jednostkowej zmiany danej zmiennej niezależnej, przy założeniu, że pozostałe zmienne niezależne pozostają bez zmian. Zastosowanie wielokrotnej regresji liniowej wymaga liniowości związku między zmiennymi, a także stałej wariancji oraz normalności rozkładu reszt, co daje wiarygodne wyniki analizy [Wątroba 2011, Welc 2009; [www.ibm.pl/wielokrotna\\_regresja](http://www.ibm.pl/wielokrotna_regresja)].

$$B = \frac{\sum(X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sum(X - \bar{X})^2} \quad (23)$$

Gdzie:  $B$  – współczynnik niestandardyzowany w regresji;  $X$  – wartości zmiennej niezależnej;  $\bar{X}$  – średnia arytmetyczna wartości zmiennej  $X$ ;  $Y$  – wartości zmiennej zależnej;  $\bar{Y}$  – średnia arytmetyczna wartości zmiennej  $Y$ .

- Testy statystyczne: analiza wariancji (ANOVA) modelu regresji służy do confirmacji istotności modelu jako całości. Weryfikuje ona hipotezę zerową mówiącą o braku istotności wszystkich współczynników regresji. W praktyce hipoteza zerowa zakłada, że wszystkie współczynniki regresji (oprócz wyrazu wolnego) są równe zero, przy założeniu, że zmienne niezależne nie mają statystycznie istotnego wpływu na zmienną zależną. W analizie regresji hipoteza zerowa dla testu  $F$  brzmi:  $H_0$ : Wszystkie współczynniki regresji są równe zero, z wyjątkiem wyrazu wolnego. Oznacza to, że żaden z niezależnych zmiennych w modelu nie ma istotnego wpływu na zmienną zależną. Hipoteza alternatywna ( $H_1$ ) jest przeciwieństwem hipotezy zerowej i brzmi:  $H_1$ : Przynajmniej jeden ze współczynników regresji jest różny od zera, co oznacza, że przynajmniej jedna zmienna niezależna ma istotny wpływ na zmienną zależną [www.home.agh.edu.pl/inzynieria\_biomedyczna; [www.ibm.pl\\_skorygowany\\_R\\_kwadrat](http://www.ibm.pl_skorygowany_R_kwadrat)].

Kolejnym etapem analizy ANOVA jest przeprowadzenie testu  $F$ , który weryfikuje istotność modelu regresji jako całości. Wartość współczynnika

determinacji skorygowanego  $R^2$  uwzględnia liczbę predyktorów i wielkość próby, co zapewnia dokładniejszą ocenę dopasowania modelu. Testowanie modelu obejmuje również analizę reszt, czyli różnic między wartościami obserwowanymi a przewidywanymi, co pozwala na ocenę jakości predykcji modelu. Obliczanie testu  $F$  odbywa się poprzez porównanie wariancji wyjaśnionej przez model z niewyjaśnioną wariancją resztową. Suma kwadratów zmiennej niezależnej (wariancji wyjaśnionej) jest obliczana przez odejmowanie średniej ogólnej od średnich dla każdej kategorii zmiennej i sumowanie kwadratów tych różnic. Ta suma jest następnie dzielona przez odpowiednią liczbę stopni swobody, aby uzyskać średni kwadrat zmiennej niezależnej. Analogicznie oblicza się średni kwadrat źródła błędu, czyli wariancję niewyjaśnioną, dzieląc sumę kwadratów reszt przez liczbę stopni swobody. W rezultacie stosunek tych dwóch wariancji (wariancji wyjaśnionej do wariancji niewyjaśnionej) daje wartość  $F$  [www.ibm.pl/analiza\_wariancji].

W analizie zmiennych środowiskowych dla próby 63 obserwacji w okresie letnim od 1 sierpnia 2022 roku do 2 października 2022 roku (tabela 14) uwzględniono m.in. pył zawieszony PM<sub>2,5</sub>, temperaturę, zachmurzenie, ciśnienie powietrza, prędkość wiatru, wilgotność względną powietrza. Z uwagi na niewielką ilość opadów deszczu w czasie pomiarów, nie zostały one uwzględnione w analizie, jednak literatura potwierdza, że opady atmosferyczne przyczyniają się do obniżenia stężenia pyłów w powietrzu [Tian, Cui 2021].

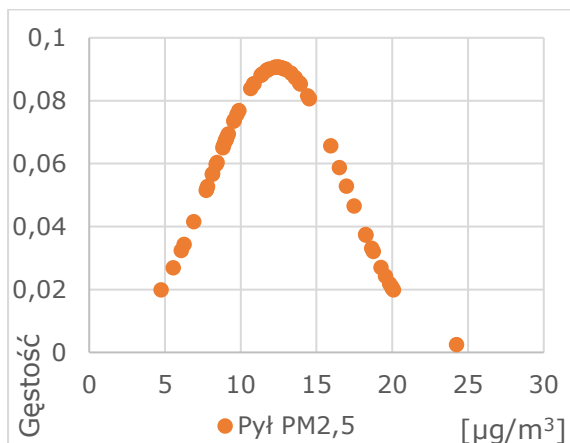
**Tabela 14.** Statystyki opisowe stężenia pyłu PM<sub>2,5</sub> i zmiennych mikroklimatycznych

Wskaźnik	N Ważne	Średnia	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Skośność	Kurtoza
Pył PM <sub>2,5</sub> [µg/m <sup>3</sup> ]	63	12,4	4,4	35,4%	0,581	-0,357
Temperatura [°C]	63	18,9	5,1	26,8%	-0,105	-1,176
Zachmurzenie [%]	63	50,2	27,9	55,6%	-0,341	-0,934
Ciśnienie powietrza [hPa]	63	1013,8	6,1	0,6%	-0,361	-0,426
Prędkość wiatru [km/h]	63	11,9	4,2	35,3%	0,642	0,492
Wilgotność względna [%]	63	58,9	13,9	23,5%	0,033	-0,852

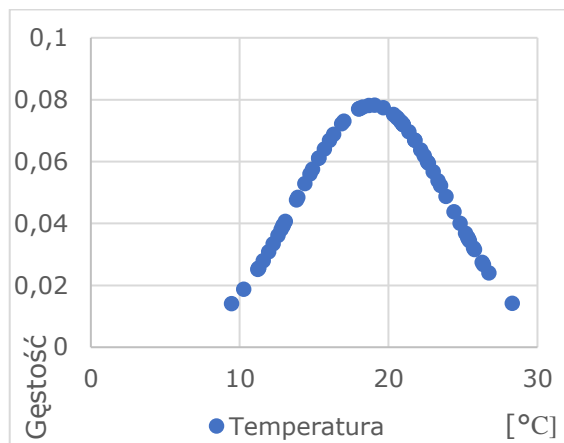
Źródło: opracowanie własne

Dla zaobserwowanych parametrów zaobserwowano różne zmienności. Na podstawie współczynnika zmienności ( $CV$ ), czyli stosunku odchylenia standardowego do średniej wyrażonego procentowo, został określony stopień zróżnicowania wartości zmiennej. Im wyższa wartość, tym większe zróżnicowanie średniej arytmetycznej. Niższa wartość natomiast oznacza mniejsze zróżnicowanie [www.mfiles.pl/współczynnik\_zmienności]. Zmienność stężenia pyłu  $PM_{2,5}$  wyniosła 35,4% średniej wartości, co oznacza umiarkowaną zmienność stężeń w analizowanym okresie, co również świadczy o obecności zmiennych źródeł emisji. Różnorodne warunki meteorologiczne wykazały różne wartości  $CV$ . Dla zachmurzenia  $CV$  z wynikiem 55,6% wykazał wysoką zmienność i duże wahania.  $CV$  wynoszący 35,3% dla prędkości wiatru oznacza dużą jego zmienność. W przypadku wilgotności względnej ( $CV=23,5\%$ ) oraz temperatury ( $CV=26,8\%$ ) zaobserwowano stosunkowo stabilne warunki. Najbardziej stabilne okazało się ciśnienie powietrza. Oznacza to, że wartości ciśnienia atmosferycznego ( $CV=0,6\%$ ) były bardzo bliskie średniej.

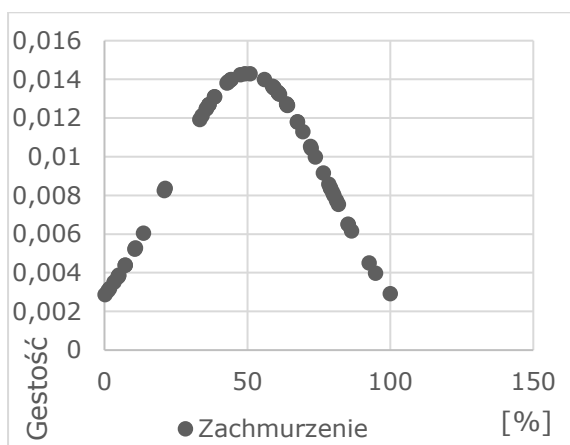
Do zmierzenia asymetrii w rozkładzie danych użyto dwóch parametrów: skośność oraz kurtoza. Skośność jest statystyką umożliwiającą porównanie rozkładu analizowanej zmiennej z hipotetycznym rozkładem normalnym. Skośność dodatnia oznacza, że większość danych jest skoncentrowana po lewej stronie średniej. Skośność równa zero oznacza, że rozkład jest symetryczny. Kurtoza to miara ilości skrajnych wartości odstających. Im wyższa wartość kurtozy, tym bardziej skupione są wartości wokół średniej, co przejawia się w smuklejszym kształcie krzywej rozkładu. Z kolei niska kurtoza oznacza większy rozrzut danych, słabą koncentrację wokół średniej i prowadzi do spłaszczenia krzywej rozkładu [www.mfiles.pl/miary\_asymetrii]. Wartości pomiarowe pyłu  $PM_{2,5}$  mają lekko prawostronnie skośny, leptokurtyczny rozkład, co widać na rysunku 46. Rozkład temperatury jest bliski symetrii, lecz wykazał cechy leptokurtyczności (rysunek 47). Zachmurzenie (rysunek 48) i ciśnienie powietrza (rysunek 49) charakteryzowały się lekką lewostronną skośnością oraz leptokurtycznym rozkładem. Prędkość wiatru (rysunek 50) oraz wilgotność względna (rysunek 51) wykazały prawostronnie skośne, leptokurtyczne rozkłady. Pokazało to większą koncentrację wartości wokół średniej, a tym samym mniejszy rozrzut danych.



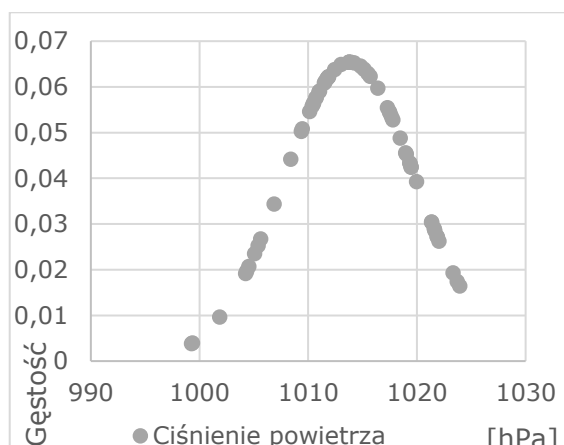
**Rys. 46.** Rozkład stężenia pyłu PM<sub>2,5</sub> w analizowanym okresie  
Źródło: opracowanie własne



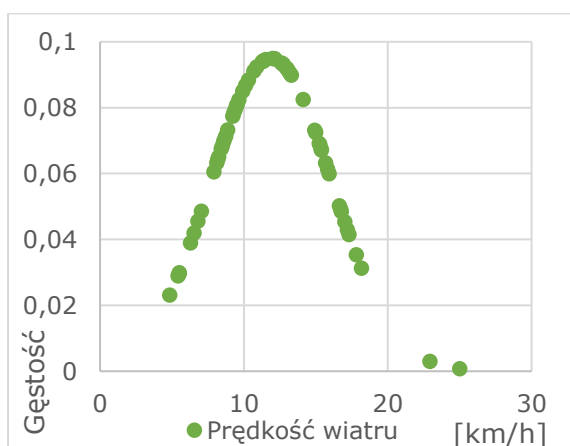
**Rys. 47.** Rozkład temperatury w analizowanym okresie  
Źródło: opracowanie własne



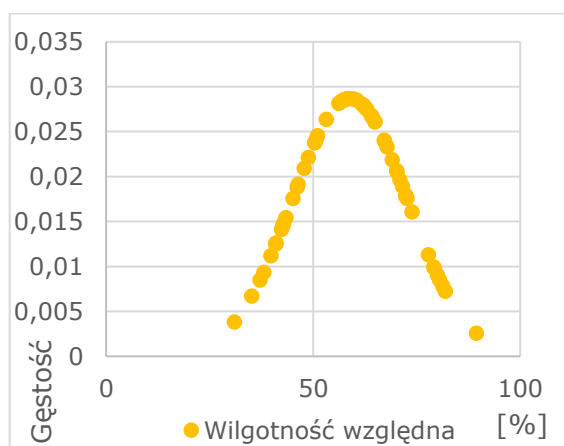
**Rys. 48.** Rozkład zachmurzenia w analizowanym okresie  
Źródło: opracowanie własne



**Rys. 49.** Rozkład ciśnienia powietrza w analizowanym okresie  
Źródło: opracowanie własne



**Rys. 50.** Rozkład zachmurzenia w analizowanym okresie  
Źródło: opracowanie własne



**Rys. 51.** Rozkład wilgotności względnej w analizowanym okresie  
Źródło: opracowanie własne

Analiza z wykorzystaniem współczynnika korelacji liniowej Pearsona (tabela 15) między poziomem pyłu PM<sub>2,5</sub> a innymi zmiennymi środowiskowymi wykazała kilka istotnych zależności. Poziom pyłu PM<sub>2,5</sub> był istotnie dodatnio skorelowany

z temperaturą (0,576). Wyższe temperatury generują wyższe poziomy zanieczyszczeń. Wartość  $p$  ( $<0,01$ ) wskazała na statystycznie istotny związek między temperaturą a stężeniem pyłu. Ujemną średnią korelację zaobserwowano pomiędzy zanieczyszczeniem pyłowym PM<sub>2,5</sub> a zachmurzeniem (-0,485). Wyższym poziomom zachmurzenia towarzyszyły niższe stężenia pyłu PM<sub>2,5</sub>. Wartość  $p$  ( $<0,01$ ) oznacza istotną zależność między zachmurzeniem a stężeniem pyłu. Ciśnienie powietrza wykazało ujemną słabą korelację z poziomem pyłu PM<sub>2,5</sub> (-0,102). Wartość  $p$  równa 0,424 oznacza, że nie można znać tej korelacji za statystycznie istotną. Zaobserwowano natomiast istotną ujemną korelację pomiędzy stężeniem pyłów a prędkością wiatru (-0,691). Większa prędkość wiatru przyspieszała proces rozpraszania zanieczyszczeń. Wartość  $p$  ( $<0,01$ ) pokazała, że zależność jest statystycznie istotna. Wilgotność względna pokazała słabą odwrotną korelację z poziomem pyłu PM<sub>2,5</sub> (-0,299). Wyższa wilgotność może (w niewielkim stopniu) przyczyniać się do redukcji stężenia pyłu w powietrzu. Wartość  $p$  równa 0,017 wskazuje na statystycznie istotny wynik. Wszystkie obliczone współzależności w analizie podkreśliły wpływ czynników środowiskowych na poziom zanieczyszczenia powietrza pyłem PM<sub>2,5</sub>.

**Tabela 15.** Współczynnik korelacji liniowej Pearsona dla zmiennych mikroklimatycznych i pyłu PM<sub>2,5</sub>

Wskaźnik	Temperatura [°C]	Zachmurzenie [%]	Ciśnienie powietrza [hPa]	Prędkość wiatru [km/h]	Wilgotność względna [%]
Pył PM <sub>2,5</sub> [µg/m <sup>3</sup> ]	0,576	-0,485	-0,102	-0,691	-0,299
Istotność (dwustronna)	<0,01	<0,01	0,424	<0,01	0,017

Źródło: opracowanie własne

Kolejnym etapem analizy statystycznej było zbadanie, w jaki sposób poszczególne zmienne niezależne (prędkość wiatru, ciśnienie powietrza, temperatura, zachmurzenie, wilgotność względna) wpływały na zmienną zależną, czyli stężenie pyłu PM<sub>2,5</sub>. Wyliczone wartości regresji wielokrotnej przedstawiono w tabeli 16. Wartość współczynnika  $R$  równa 0,796, świadczyła o bardzo wysokiej, dodatniej korelacji pomiędzy predyktorami a zanieczyszczeniem pyłowym. Wartość współczynnika determinacji  $R^2$  (0,634) wskazała, że model wyjaśnił 63,4% zmienności stężenia pyłu, a wynik uznano za zadowalający. Skorygowany  $R^2$  równy 0,602, uwzględnił liczbę zmiennych i liczbę obserwacji, co potwierdziło, że 60,2% zmienności w stężeniu pyłu PM<sub>2,5</sub> było wyjaśnione przez predyktory

w modelu. Przy użyciu wyliczonego błędu standardowego oszacowania stwierdzono, że różnica między obserwowanymi a przewidywanymi wartościami stężenia pyłu PM<sub>2,5</sub> wyniosła 2,76711. Podsumowując, model regresji wykazał, że zmienne środowiskowe istotnie wpływają na poziom zanieczyszczenia powietrza.

**Tabela 16.** Wyniki analizy regresji wielokrotnej dla zmiennej zależnej: stężenie pyłu PM<sub>2,5</sub>

Model	R	R-kwadrat	Skorygowane R-kwadrat	Błąd standardowy oszacowania
1	0,796 <sup>a</sup>	0,634	0,602	2,76711

a. Predyktory: Prędkość wiatru [km/h], Ciśnienie powietrza [hPa], Temperatura [°C], Zachmurzenie [%], Wilgotność względna [%]

b. Zmienna zależna: Pył PM<sub>2,5</sub> [µg/m<sup>3</sup>]

Źródło: opracowanie własne

Aby ocenić, czy model regresji jest istotny statystycznie, wykonano testowanie statystyczne: analiza wariancji (ANOVA) (tabela 17). Przebieg testowania był następujący:

#### 1. Hipotezy:

- Hipoteza zerowa H<sub>0</sub>: Wszystkie współczynniki regresji są równe zero (z wyjątkiem wyrazu wolnego), co oznacza, że zmienne niezależne (prędkość wiatru, ciśnienie powietrza, temperatura, zachmurzenie, wilgotność względna) nie mają istotnego wpływu na zmienną zależną. Formalnie:  $\beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$ ;
- Hipoteza alternatywna H<sub>1</sub>: Przynajmniej jeden ze współczynników regresji jest różny od zera, co oznacza, że przynajmniej jedna ze zmiennych niezależnych ma istotny wpływ na zmienną zależną. Formalnie:  $\beta_i \neq 0$  dla przynajmniej jednego  $i$ .

#### 2. Analiza wyników testu (ANOVA):

- Suma kwadratów regresji: Wartość 755,976 wskazuje na ilość zmienności w stężeniu pyłu PM<sub>2,5</sub> wyjaśnioną przez model regresji;
- Suma kwadratów resztkowa: Wartość 436,443 wskazuje na ilość zmienności, która nie została wyjaśniona przez model;
- Suma kwadratów całkowita: Wartość 1192,419 stanowi sumę kwadratów regresji i sumy kwadratów resztkowej, co oznacza całkowitą zmienność w stężeniu pyłu PM<sub>2,5</sub>.

### 3. Średni kwadrat:

- Średni kwadrat regresji: Wartość równa 151,195 oznacza średnią zmienność wyjaśnioną przez każdą zmienną niezależną;
- Średni kwadrat resztkowy: Wartość równa 7,657 oznacza średnią zmienność niewyjaśnioną przez model.

### 4. Statystyka $F$ :

- Wartość  $F$ : Wartość równa 19,746 jest stosunkiem średniego kwadratu regresji (151,195) do średniego kwadratu resztkowego (7,657);
- Interpretacja: Wysoka wartość  $F$  oznacza, że model regresji dobrze wyjaśnił zmienność stężenia pyłu  $PM_{2,5}$  w porównaniu do zmienności resztkowej.

### 5. Istotność:

- $P$ -wartość: Istotność na poziomie  $<0,001$  pozwala na odrzucenie hipotezy zerowej.

Na podstawie przeprowadzonego testu ANOVA można stwierdzić, że model jest statystycznie istotny (z prawdopodobieństwem ponad 99,9%). Zmienne niezależne (predyktory) miały istotny wpływ na zmienną zależną (stężenie pyłu  $PM_{2,5}$ ). Przynajmniej jedna zmienna (prędkość wiatru, ciśnienie powietrza, temperatura, zachmurzenie, wilgotność względna) istotnie wpływała na poziom zanieczyszczenia pyłem, a wyniki nie są dziełem przypadku.

**Tabela 17.** Wyniki analizy wariancji (ANOVA) dla modelu regresji wyjaśniającego zależność stężenia pyłu  $PM_{2,5}$  od zmiennych mikroklimatycznych

Model	Suma kwadratów	Df	Średni kwadrat	F	Istotność
1 Regresja	755,976	5	151,195	19,746	$<0,001^b$
Reszta	436,443	57	7,657		
Ogółem	1192,419	62			

a. Zmienna zależna: Pył  $PM_{2,5}$  [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]

b. Predyktory: (Stała) Prędkość wiatru [km/h], Ciśnienie powietrza [hPa], Temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ], Zachmurzenie [%], Wilgotność względna [%]

Źródło: opracowanie własne

Tabela 18 zawiera wyniki analizy współczynników regresji wielokrotnej dla zmiennej zależnej, jaką jest stężenie pyłu  $PM_{2,5}$ . Współczynniki niestandardyzowane pokazały, o ile jednostek zmieni się wartość zmiennej zależnej

(PM<sub>2,5</sub>) przy zmianie danej zmiennej niezależnej o jedną jednostkę, przy założeniu, że pozostałe zmienne pozostają stałe. Współczynniki standaryzowane ( $\beta$ ) pozwalają porównać wpływ różnych zmiennych na zmienną zależną w tej samej skali. Na podstawie wyników stwierdzono, że wartość prędkości wiatru (-0,522) sygnalizuje, że każdy wzrost prędkości wiatru o 1 km/h prowadzi do spadku stężenia pyłu PM<sub>2,5</sub> o 0,522 jednostki. Wartość współczynnika  $t$  dla prędkości wiatru (-5,809,  $p < 0,001$ ) jest wysoka, co wskazuje na istotny statystycznie wpływ tego predyktora. Temperatura i ciśnienie powietrza również wykazały istotny wpływ, co potwierdziły ich współczynniki  $t$  (dla temperatury powietrza 2,446, dla ciśnienia powietrza -2,302). Zachmurzenie, wilgotność względna nie są w tym teście istotne statystycznie.

**Tabela 18.** Wyniki analizy regresji wielokrotnej dla stężenia pyłu PM<sub>2,5</sub>

Model	Współczynniki niestandaryzowane		Współczynniki standaryzowane		
	B	Błąd standardowy	$\beta$	$t$	Istotność
(Stała)	179,368	71,749		2,500	0,015
Temperatura [°C]	0,229	0,094	0,266	2,446	0,018
Zachmurzenie [%]	-0,022	0,019	-0,143	-1,203	0,234
Ciśnienie powietrza [hPa]	-0,160	0,069	-0,223	-2,302	0,025
Prędkość wiatru [km/h]	-0,544	0,094	-0,522	-5,809	<0,001
Wilgotność względna [%]	-0,030	0,042	-0,094	-0,701	0,486

a. Zmienna zależna: pył PM<sub>2,5</sub> [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]  
 Źródło: opracowanie własne

Przedstawione wyliczone współczynniki w modelu regresji wielokrotnej dla poziomu stężenia pyłu PM<sub>2,5</sub> opisano równaniem regresji (24). Na podstawie modelu stwierdzono, że temperatura, ciśnienie powietrza oraz prędkość wiatru mają istotny wpływ na stężenie pyłu PM<sub>2,5</sub> w powietrzu. Stała w modelu wynosząca 171,831 oznacza, że przy zerowych wartościach wszystkich zmiennych predykcyjnych przewidywany poziom pyłu PM<sub>2,5</sub> wynosiłby 179,368 jednostek. Współczynnik niestandaryzowany  $B$  odnoszący się do temperatury równy 0,160 wskazał, że każdy wzrost temperatury o 1°C prowadzi do zwiększenia stężenia pyłu o 0,160 jednostki. W przypadku ciśnienia ujemna wartość współczynnika wykazała, że każdy wzrost poziomu ciśnienia o 1 hPa prowadzi do spadku stężenia pyłu PM<sub>2,5</sub> o 0,160 jednostki. Najsilniejszy wpływ na poziom pyłu PM<sub>2,5</sub> ma

prędkość wiatru. Ujemny współczynnik przy prędkości wiatru oznacza, że każdy wzrost prędkości wiatru o 1 km/h prowadzi do spadku poziomu pyłu PM<sub>2,5</sub> o 0,544 jednostki. Pozostałe zmienne nie miały istotnego wpływu na zmienność stężenia pyłu.

$$c_{PM_{2,5}} = 179,368 + 0,229 * t - 0,160 * p - 0,544 * v_w \quad (24)$$

Gdzie:  $c_{PM_{2,5}}$  – stężenie pyłu PM<sub>2,5</sub>, µg/m<sup>3</sup>;  $t$  – temperatura powietrza, °C;  $p$  – ciśnienie powietrza, hPa;  $v_w$  – prędkość wiatru, km/h.

Przeprowadzona analiza regresji pokazuje, że czynniki mikroklimatyczne i meteorologiczne są kluczowe przy predykcji stężeń pyłów w powietrzu. Wzrost temperatury wpływa na dyspersję zanieczyszczeń, natomiast w niektórych warunkach, co również dowiodły badania własne, powoduje pogorszenie jakości powietrza w zależności od lokalnych warunków. Badania przeprowadzone w północnych Chinach w 2020 roku również potwierdziły korelację tych dwóch parametrów: wzrost temperatury był związany ze zwiększeniem stężenia zanieczyszczeń powietrza [Liu i in. 2020]. W teorii wyższe atmosferyczne sprzyjają stagnacji powietrza, co prowadzi do kumulacji zanieczyszczeń w pobliżu źródła emisji. Przeprowadzony model jednak pokazał, że w badanym okresie wyższe atmosferyczne sprzyjały zmniejszeniu stężenia zanieczyszczeń w atmosferze. Można to wyjaśnić szczególnymi warunkami panującymi w czasie wyżów (np. suche powietrze). W suchym powietrzu depozycja cząstek pyłów PM<sub>2,5</sub> jest intensywniejsza (nawet 10-krotnie) niż w warunkach wilgotnych, co prowadzi do znaczącej redukcji zanieczyszczeń w powietrzu [Zhu i in. 2016]. Prędkość wiatru jest nadrzędna w rozpraszaniu zanieczyszczeń: ze wzrostem prędkości zmniejsza ich koncentrację na danym obszarze. Wyniki w modelu podkreśliły specyfikę warunków panujących w Krakowie, które decydują o jakości powietrza. Ma na to również wpływ zarówno topografia obszaru, jak i napływające zanieczyszczenia transgraniczne [Korzeniowska-Rejmer, Generowicz 2012].

## **Rozdział IV. Modelowanie trajektorii wstecznych mas powietrza oraz dyspersji zanieczyszczeń**

Niniejszy rozdział poświęcony jest ocenie wpływu wybranych punktowych źródeł zanieczyszczeń pyłowych PM<sub>2,5</sub> w aglomeracji krakowskiej na mechanizmy kształtowania się czynników mikroklimatycznych oraz na stopień dyspersji zanieczyszczeń. Praca zakłada przeprowadzenie symulacji transportu mas powietrza i zanieczyszczeń w aglomeracji krakowskiej. Do obliczenia adwekcji i dyfuzji podczas przemieszczania się powietrza wykorzystano model *HYSPLIT*, opierający się na trajektoriach wstecznych, polegający na śledzeniu historii ruchu mas powietrza i przewidywaniu ich przebiegu. Grupowanie trajektorii o podobnych cechach w przestrzeni i czasie ułatwia analizę i interpretację szlaków transportu zanieczyszczeń. Wyniki symulacji zweryfikowano poprzez analizę map synoptycznych Europy w epizodach podwyższonych stężeń zanieczyszczeń.

### **4.1. Model HYSPLIT**

Oprogramowanie *HYSPLIT* (*Hybrid Single-Particles Lagrangian Integrated Trajectories*) jest hybrydowym rozwiązaniem podejścia Lagrange'a, opracowanym przez agencję rządową *National Oceanic and Atmospheric Administration Air Resources Laboratory* (*The NOAA Research Laboratories*) [Stein i in. 2021]. W metodzie stosuje się układ odniesienia do obliczenia adwekcji i dyfuzji w miarę przemieszczania się powietrza oraz metodę Eulera, która wykorzystuje stałą trójwymiarową siatkę jako układ odniesienia. Dyspersja krótkoterminowa natomiast obliczana jest w odniesieniu do dyspersji kłębow (*puff dispersion*) lub cząstek. W modelu kłębow, które rozszerzają się pionowo lub poziomo, aż do przekroczenia siatki meteorologicznej, następuje dzielenie na wiele nowych strumieni. Stała liczba cząstek jest przemieszczana w modelu przez średnie pole wiatru i rozpraszana przez element turbulentny [[www.arl.noaa.gov/HYSPLIT](http://www.arl.noaa.gov/HYSPLIT)]. Zastosowanie modelu pomogło w interpretacji transportu zanieczyszczeń w różnych obszarach i okresach. Śledzenie historii mas powietrza i przewidywanie ich ruchu opierało się na trajektoriach, uwzględniających niepewność w zakresie

wzorców wiatru. Grupowanie trajektorii o podobnych cechach w przestrzeni i czasie jest niezawodne przy określaniu szlaków transportu zanieczyszczeń w atmosferze [Stein i in. 2021]. W programie *HYSPLIT* do analizy wybrano modelową prędkość pionową, która wykorzystuje dane modelu prognoz mikroklimatycznych do bezpośredniego obliczania pionowych prędkości wiatru. Dodatnia wartość prędkości pionowej ( $W$ ) oznacza, że powietrze unosi się w atmosferze (konwekcja), co wywołuje niestabilne warunki atmosferyczne, powstawanie chmur, intensywne opady oraz występowanie burz. Ujemna prędkość ( $W$ ) natomiast oznacza opadanie powietrza, co powoduje stabilizację atmosfery oraz tworzenie układów wysokiego ciśnienia. Prędkość pionową wyraża się według wzoru (25) [www.arl.noaa.gov/vertical]:

$$W = \frac{\left(-\frac{\partial q}{\partial t} - u \frac{\partial q}{\partial x} - v \frac{\partial q}{\partial y}\right)}{\left(\frac{\partial q}{\partial z}\right)} \quad (25)$$

Gdzie:  $W$  - prędkość potrzebna, aby trajektoria pozostała stała na powierzchni  $q$  (ciśnienia atmosferycznego w przypadku obliczeń izobarycznych lub temperatury potencjalnej w przypadku obliczeń izentropowych), m/s;  $\partial q/\partial t$  - zmiana  $q$  w czasie, Pa/s lub K/s;  $u \partial q/\partial x$  - adwekcja pozioma  $q$  w kierunku  $x$  przez komponent wiatru  $u$ , m/s;  $v \partial q/\partial y$  - adwekcja pozioma  $q$  w kierunku  $y$  przez komponent wiatru  $v$ , m/s;  $\partial q/\partial z$  - zmiana  $q$  w kierunku pionowym, Pa/s lub K/s.

Do obliczania normalnej trajektorii, a także dyspersji zanieczyszczeń, posłużono się danymi mikroklimatycznymi *The Global Data Assimilation System (GDAS)* o rozdzielczości  $1^\circ$  dla globalnych danych dostępnych od 2006 roku [Stein i in. 2021]. *GDAS* jest kompleksowym systemem, który integruje różnorodne źródła danych pogodowych, takie jak obserwacje powierzchniowe, balony meteorologiczne, profile wiatru, raporty samolotów, dane radarowe i satelitarne. Dane są następnie przetwarzane i wprowadzane do trójwymiarowego modelu siatkowego. To umożliwia generowanie prognoz pogodowych. System obsługuje różne formaty danych, takie jak *The Binary Universal Form for the Representation of meteorological data (BUFR)* i *General Regularly-distributed Information in Binary form (GRIB)*. Różne formaty danych zapewniają elastyczność w przetwarzaniu i analizie informacji. W efekcie system *GDAS* poprawia dokładność prognoz pogody, które mają istotne znaczenie dla różnych sektorów, od rolnictwa po transport. Analiza trajektorii mas powietrza pomaga rozpoznać źródła i szlaki

transportu zanieczyszczeń PM<sub>2,5</sub> w danym obszarze. Ponadto zrozumienie wpływu głównych układów cyrkulacyjnych oraz stref frontowych na kształtowanie się warunków pogodowych i jakość powietrza jest strategiczne dla efektywnego monitorowania i zarządzania jakością powietrza [Council of the European Union 2011; [www.ncei.noaa.gov](http://www.ncei.noaa.gov)].

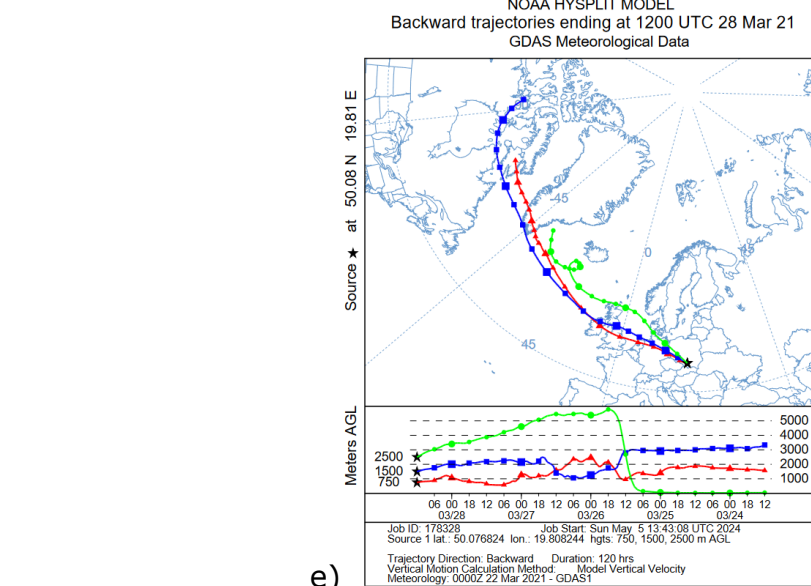
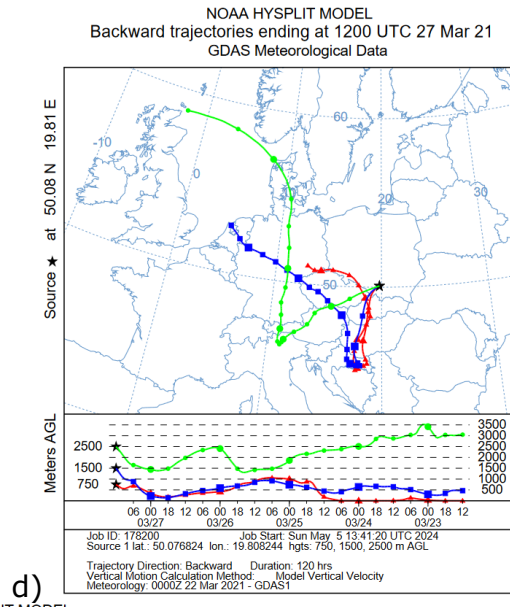
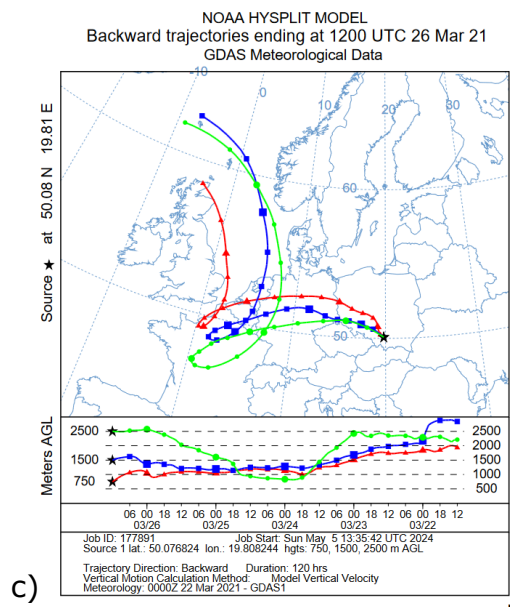
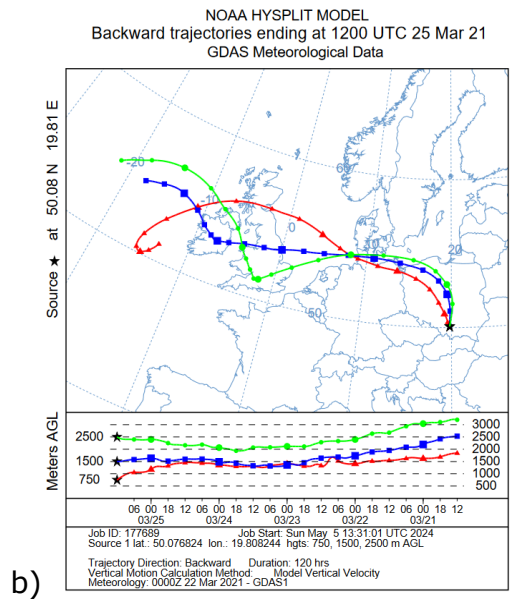
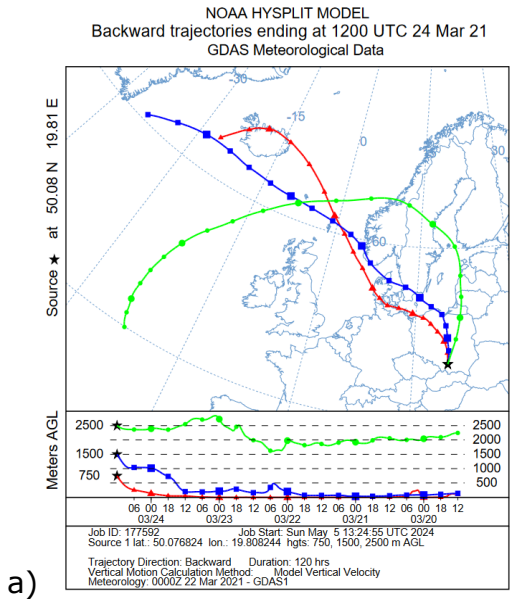
W celu potwierdzenia wyliczonych modeli trajektorii wstecznych mas powietrza przeprowadzono analizę map synoptycznych dla godziny 12.00 (*UTC*). Mapy zostały przygotowane przez Holenderski Instytut Mikroklimatyczny (*KNMI*), którego zadaniem jest prognozowanie pogody oraz monitorowanie warunków atmosferycznych, klimatu, jakości powietrza i aktywności sejsmicznej [[www.knmi.nl/about](http://www.knmi.nl/about)]. Analiza map pozwoliła na szczegółowe przedstawienie i opisanie panujących warunków mikroklimatycznych podczas epizodu zwiększonego stężenia zanieczyszczeń, ale także potwierdzenie wyliczonych modeli.

#### **4.1.1. Model trajektorii wstecznych mas powietrza**

Celem analizy było określenie kierunków napływu mas powietrza nad badany obszar. Analizę przeprowadzono zarówno dla pomiarów automatycznych, jak i manualnych. Zgodnie z wytycznymi Komisji Europejskiej symulacja uwzględniła następujące elementy: 5-dniowe wsteczne trajektorie mas powietrza, dane pomiarowe dla godziny 12:00 (*UTC*) każdego z analizowanych dni, trzy wysokości poziomów symulacji nad poziomem gruntu (750 m, 1500 m, 2500 m) oraz modelowanie pionowego profilu prędkości wiatru [Council of the European Union 2011].

**Analiza modelu wstecznych trajektorii mas powietrza dla punktu pomiarowego Port Lotniczy Kraków-Balice.** Do analizy trajektorii wstecznych mas powietrza wytypowano 5-dniowy epizod zwiększonego godzinne stężenia zanieczyszczeń pyłów zawieszonych PM<sub>2,5</sub>, od 24 marca 2021 roku do 28 marca 2021 roku, gdzie odnotowano godzinne wartości od 22 µg/m<sup>3</sup> do 40 µg/m<sup>3</sup>.

W punkcie pomiarowym Kraków-Balice analiza modeli *HYSPLIT* wstecznych trajektorii mas powietrza (rysunek 52), napływających podczas epizodu, pokazała, co następuje:



**Rys. 52.** Model *HYSPLIT* dla trajektorii wstecznych w punkcie pomiarowym Kraków-Balice w 2021 roku dla: a) 24.03, b) 25.03, c) 26.03, d) 27.03, e) 28.03  
Źródło: [www.arl.noaa.gov/trajjectory]

- a) w dniu 24 marca 2021 roku zaobserwowano napływ mas powietrza do Polski z północnej części kraju oraz znad Oceanu Atlantyckiego. W przypadku zadanej wysokości 750 m i 1500 m masy powietrza przemieszczały się od wybrzeży Islandii przez wybrzeża Norwegii, Niemiec oraz Danii. Wpływ na to miały główne układy cyrkulacyjne: wyż znad Atlantyku i niż nad Europą. Trajektorie te pokazały ruch mas powietrza blisko powierzchni terenu, toteż były one wyjątkowo narażone na lokalne warunki meteorologiczne. Zaobserwowano gwałtowne wznoszenie mas powietrza docierających do aglomeracji krakowskiej. Natomiast dla wyższej wysokości, 2500 m, masy powietrza napływały przez obszar Norwegii i Szwecji, a także przeszły przez wybrzeża Estonii oraz Łotwę, Litwę i Rosję. Opis uwzględnił nie tylko kierunek napływu mas powietrza, ale również pokazał potencjalne czynniki meteorologiczne, takie jak układy baryczne, które mogły wpłynąć na tę sytuację atmosferyczną;
- b) w dniu 25 marca 2021 roku masy powietrza napływały również znad Oceanu Atlantyckiego, przechodząc przez północno-zachodnią część Polski. Bez względu na wysokość trajektorii masy powietrza przemieszczały się przez obszar Wielkiej Brytanii, a następnie kontynuowały swój szlak przez wybrzeża Danii oraz Niemiec. Ten kierunek napływu mógł być rezultatem dominujących układów barycznych oraz kształtowania się strefy frontowej na północnym Atlantyku, która miała istotny wpływ na kształtowanie się warunków pogodowych w Polsce;
- c) w dniu 26 marca 2021 roku trajektoria na wysokości 750 m pokazała ruch mas powietrza nad Atlantykiem i przechodziła przez wybrzeża Wielkiej Brytanii, aż po wybrzeża północnej Francji. Następnie masy poruszały się z zachodu na wschód, przez kraje Beneluxu i Niemcy, w końcu dotarły do Polski od zachodu. Masy powietrza na tej wysokości były szczególnie narażone na lokalne warunki. W przypadku trajektorii na wysokości 1500 m zaobserwowano ruch również od Atlantyku, przez kraje Beneluxu, po północną Francję. Następnie przechodząc przez środkowe Niemcy, dotarły od strony zachodniej do Polski, aż po punkt pomiarowy. Najwyższa trajektoria znad Oceanu Atlantyckiego (2500 m) miała podobny przebieg jak trajektoria na wysokości 1500 m. Wyżej położone masy dotarły natomiast bardziej w głąb centralnej Francji, a następnie zawróciły i przemieszczając się przez centralne Niemcy, dotarły do zachodniej części Polski;

- d) w dniu 27 marca 2021 roku trajektoria na wysokości 750 m pokazała ruch powietrza od wschodniej strony Niemiec. Masy, docierając do Polski, a następnie kierując przez wschodnie Czechy oraz centralną Słowację i Węgry, dotarły do północnej części Chorwacji, gdzie zawróciły i skierowały się w stronę Balic przez Węgry oraz Słowację. W przypadku zadanej trajektorii na wysokości 1500 m zaobserwowano ruch mas powietrza od wybrzeży Holandii przez centralne Niemcy, Czechy, północno-wschodnią Austrię oraz Węgry, do Chorwacji, a następnie masy skierowały się w stronę Polski przez Węgry oraz Słowację. Zarówno masy powietrza na wysokości 750 m, jak i 1500 m, z uwagi na przemieszczanie się blisko powierzchni terenu, były szczególnie narażone na panujące lokalne zjawiska meteorologiczne. W przypadku trajektorii na wysokości 2500 m masy powietrza napływały od północnych wybrzeży Wielkiej Brytanii, przez Danię, Niemcy, Austrię, dotarła do północnej części Włoch, po czym skierowała się w stronę Polski przez Austrię oraz Czechy;
- e) w dniu 28 marca 2021 roku trasa mas powietrza na wysokości 750 m biegła od Ziemi Baffina, przez Grenlandię, Irlandię, Wielką Brytanię, Holandię oraz Niemcy, do zachodniej do Polski. Trajektoria na wysokości 1500 m pokazała ruch mas od Wysp Królowej Elżbiety, przez wybrzeża Grenlandii, następnie biegła podobnie jak trajektoria na wysokości 750 m. Najwyższa trajektoria na wysokości 2500 m przemieszczała znad Oceanu Atlantyckiego, przez północne wybrzeża Wielkiej Brytanii, Danię oraz Niemcy, dotarła do docelowego punktu w Polsce.

W analizowanym epizodzie od 24 marca 2021 r. do 28 marca 2021 r. powietrze napływało do Polski głównie znad Oceanu Atlantyckiego. Często przechodziło przez Wielką Brytanię, Niemcy i inne kraje Europy Zachodniej i Północnej. Szlaki mas powietrza wyglądały podobnie na różnych wysokościach (750 m, 1500 m, 2500 m), ale każda z nich miała swoją własną, unikalną trasę. Lokalna pogoda miała większy wpływ na niższe ścieżki (750 m). Wyższe ścieżki (1500 m i 2500 m) wykazywały wpływ dominujących układów barycznych i cyrkulacji atmosferycznych. Powietrze było przemieszczane z zachodu na wschód, a wpływ atlantyckich warunków pogodowych został wyraźnie zaznaczony. Trajektorie przyniosły zmienne warunki meteorologiczne, charakterystyczne dla terenów nadmorskich i kontynentalnych, przez które biegły. Masy powietrza, przemieszczające się blisko powierzchni terenu, szczególnie 24 i 27 września, były odzwierciedleniem warunków lokalnych.

Analizując mapy synoptyczne (rysunek 53) dla okresu epizodu od 24 marca 2021 roku do 28 marca 20221 roku, dla godziny 12:00 (UTC), można było zaobserwować następujące warunki meteorologiczne:

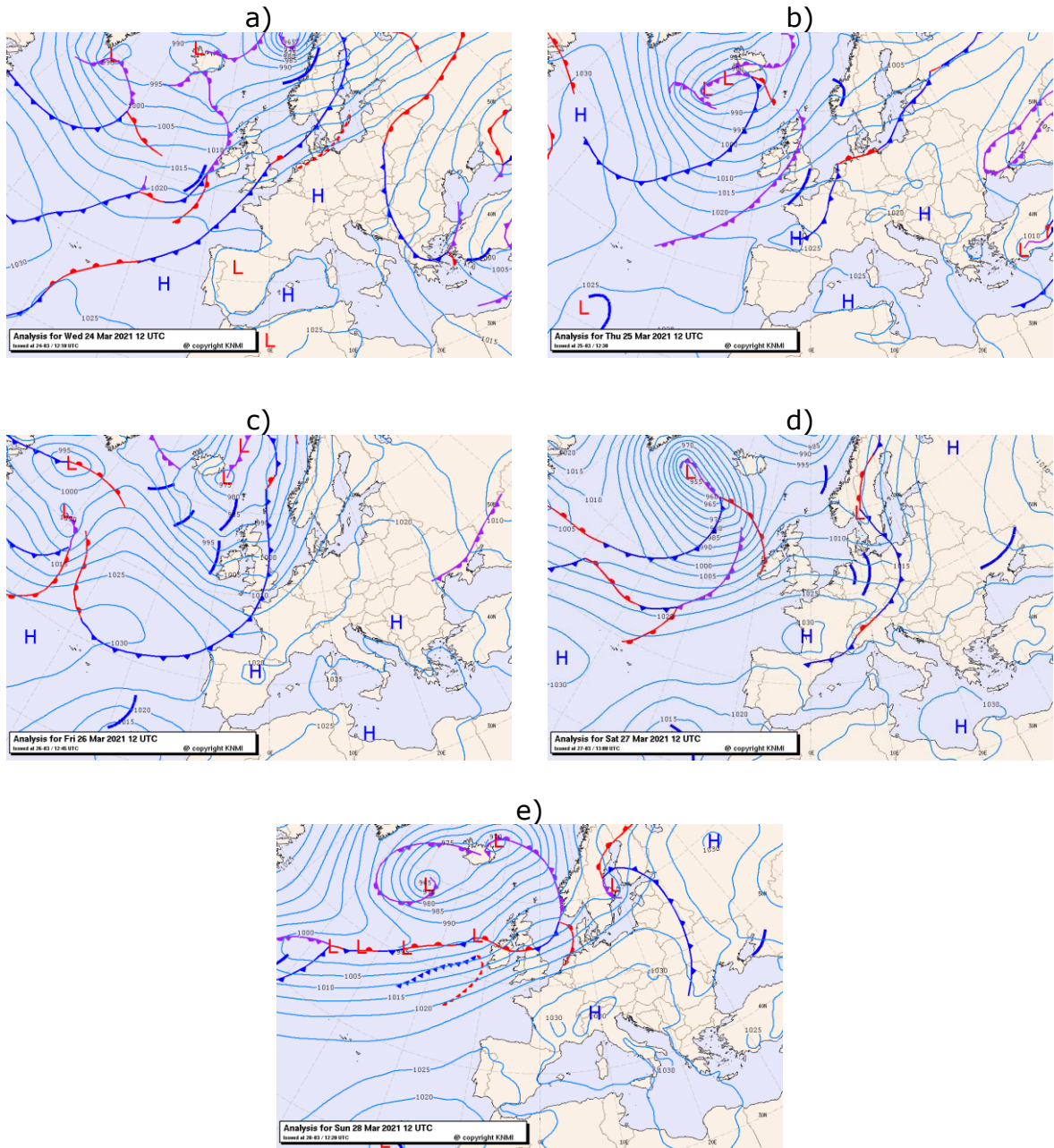
- a) W dniu 24 marca 2021 roku nad północnym Atlantykiem, na północ od Islandii, znajduje się układ niskiego ciśnienia, przynoszący wilgotne i zmienne warunki pogodowe, natomiast nad południową Europą i nad Atlantykiem rozciągają się układy wysokiego ciśnienia, zapewniając stabilne i suche warunki. W Wielkiej Brytanii i Europie Północno-Zachodniej przechodzi front chłodny, powodując ochłodzenie i opady deszczu, a w pobliżu północnych wybrzeży Norwegii widoczny jest front okluzji, wskazujący na złożone warunki pogodowe. W Polsce, szczególnie w jej południowej części, przechodzący front chłodny dolny przynosił ochłodzenie i możliwość opadów deszczu, warunki były zmienne z powodu wpływu frontów atmosferycznych i układów niskiego ciśnienia z Europy Północno-Zachodniej;
- b) W dniu 25 marca 2021 roku występował układ niskiego ciśnienia w pobliżu północnego Atlantyku. Był on odpowiedzialny za zmienność warunków pogodowych i wilgotność. Na skutek układów wysokiego ciśnienia w północnej i południowej Europie dominowały stabilne i suche warunki. W przeciwieństwie do tego, w Wielkiej Brytanii i krajach Beneluksu obecny był front chłodny, który miał wpływ na spadek temperatury i opady deszczu. W południowej części Polski front powodował spadek temperatury i możliwość opadów deszczu, lecz ze względu na wyraźne wysokie ciśnienie z południa Europa pogoda w tym regionie nie ulegała zmianie;
- c) W dniu 26 marca 2021 roku zaobserwowano wysokie ciśnienie nad Bałkanami, które wpływało na stabilne warunki pogodowe w Polsce. Niż nad północnym Atlantykiem i Wielką Brytanią powodował zmienne warunki meteorologiczne z przesuującym się chłodnym frontem atmosferycznym. W południowej Polsce dominowało wysokie ciśnienie, które zapewniło stabilne warunki, natomiast bliska linia okluzji od wchodu mogła przynosić zachmurzenie i opady deszczu;
- d) W dniu 27 marca 2021 roku występował układ wysokiego ciśnienia w południowej Europie, który zapewnił stabilne warunki pogodowe. Nad północnym Atlantykiem natomiast znajdował się układ niskiego ciśnienia, który przynosił zmienne warunki meteorologiczne i zaczynał wpływać na zachodnią Europę. W tym samym czasie ciepły front przesuwał się na wchód przez

Atlantyk. W Polsce dominowały wpływy wysokiego ciśnienia, które powodowały stabilną pogodę, natomiast od zachodu napływał front zimny dolny, który powodował ochłodzenie;

- e) W dniu 28 marca 2021 roku zaobserwowano układ wysokiego ciśnienia nad południową Europą, który zapewniał stabilną i suchą pogodę. Nad północnym Atlantykiem znajdował się głęboki układ niskiego ciśnienia, który przynosił zmienne warunki meteorologiczne. Chłodny front przechodził przez Wielką Brytanię, powodując ochłodzenie i zmiany pogodowe. W Polsce dominowały wpływy wysokiego ciśnienia, ale przechodzący front dolny zimny przyniósł ochłodzenie. Bliskość chłodnego frontu od zachodu w kolejnych dniach mogła spowodować ochłodzenie i przelotne opady deszczu.

W analizowanym epizodzie od 24 marca 2021 r. do 28 marca 2021 r. nad Europą zaobserwowano zmienne warunki meteorologiczne. Układy niskiego ciśnienia nad północnym Atlantykiem przynosiły wilgotne powietrze. W tym samym czasie układy wysokiego ciśnienia nad południową Europą zapewniały stabilną i suchą pogodę. W Polsce wpływ wyżu znad południowej Europy stabilizował warunki meteorologiczne, pomimo bliskości wyżu na zachodzie. Fronty chłodne przemieszczały się znad Północnego Atlantyku przez Wielką Brytanię, które również zaczęły zmierzać w stronę Polski, gdzie w rezultacie przyniósł ochłodzenie. Wpływ chłodnych frontów powodował okresowe zmiany meteorologiczne.

Porównując analizę modeli *HYSPLIT* trajektorii wstecznych mas powietrza z mapami synoptycznymi w okresie od 24 marca 2021 roku do 28 marca 2021 roku, zaobserwowano podobieństwa. W obu przypadkach miał miejsce napływ mas powietrza głównie znad Oceanu Atlantyckiego. Modele na różnych wysokościach (750 m, 1500 m, 2500 m) wykazały podobne trajektorie napływu powietrza, zgodne z danymi z map synoptycznych, obejmujących układy baryczne i fronty atmosferyczne. W mapach synoptycznych zaobserwowano dominujący wpływ układów niskiego ciśnienia nad Atlantykiem, które przynosiły wilgotne i zmienne warunki meteorologiczne. Zjawisko potwierdziły modele trajektorii wstecznych mas powietrza. Ponadto układy wysokiego ciśnienia w południowej części Europy utrzymywały w Polsce stabilną pogodę. Zaobserwowano również przemieszczanie się frontu chłodnego w kierunku Polski, który przynosił ochłodzenie. Wahania pogody potwierdzają zarejestrowane dane meteorologiczne w czasie wykonywania pomiarów (załącznik 2).



**Rys. 53.** Mapy synoptyczne dla godz. 12:00 UTC: a) 24 marca 2021; b) 25 marca 2021; c) 26 marca 2021; d) 27 marca 2021; e) 28 marca 2021  
 Źródło: [[www.knmi.nl/weerkaarten](http://www.knmi.nl/weerkaarten)]

## **Analiza modelu wstecznych trajektorii mas powietrza dla punktu pomiarowego Kraków, ul. Bulwarowa**

Dla pomiarów metodą grawimetryczną (manualną) do analizy trajektorii wstecznych mas powietrza wytypowano 5-dniowy epizod zwiększonego godzinnego stężenia zanieczyszczeń pyłów zawieszonych PM<sub>2,5</sub>, od 15 sierpnia 2022 r. do 19 sierpnia 2022 r., gdzie odnotowano 24-godzinne wartości około 20 µg/m<sup>3</sup>.

Analiza modeli *HYSPLIT* wstecznych trajektorii mas powietrza (rysunek 54), napływających podczas epizodu pokazała, co następuje:

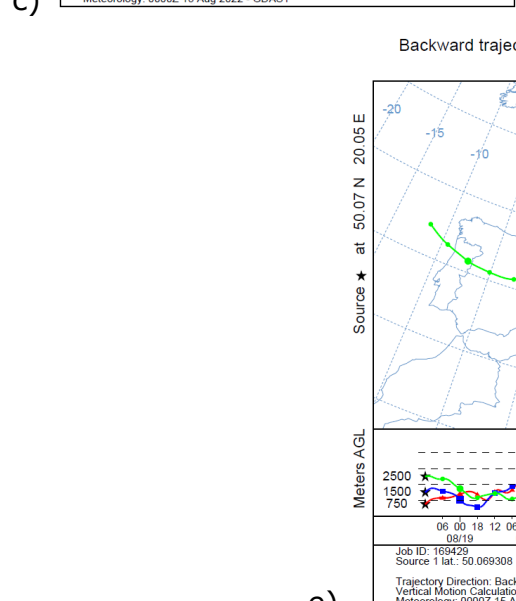
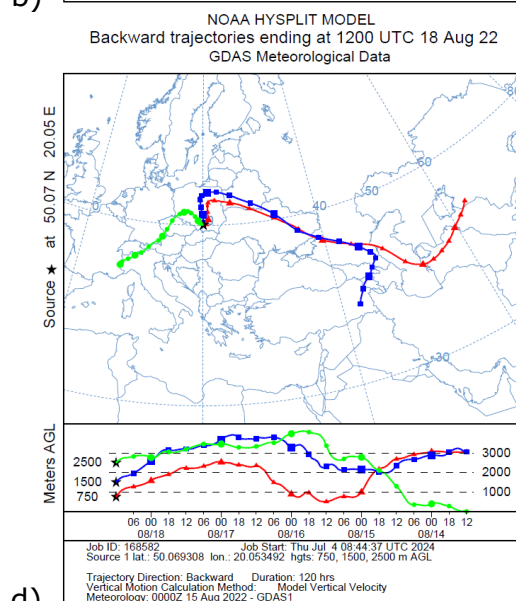
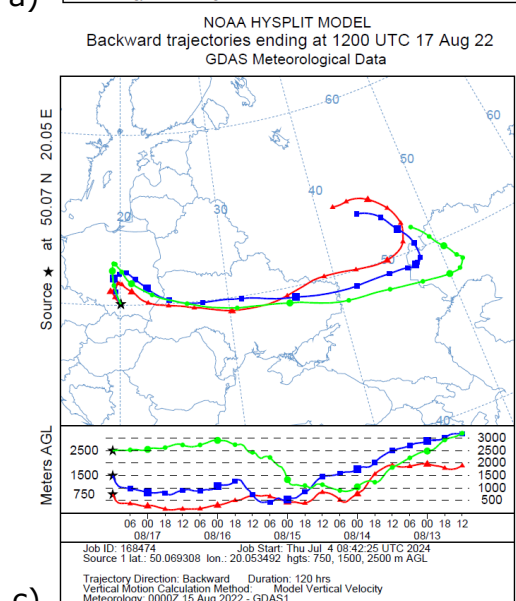
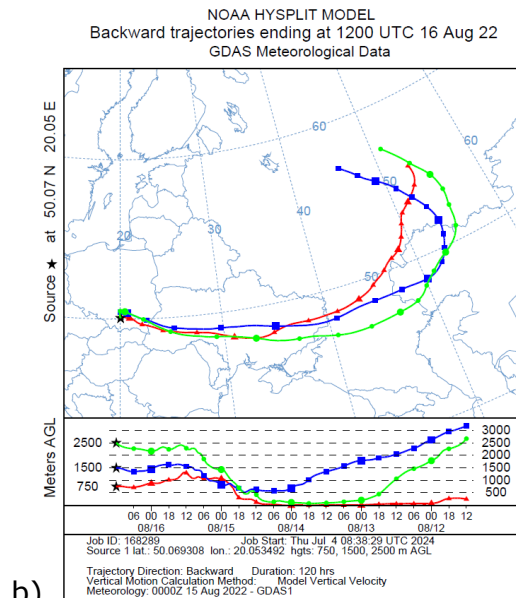
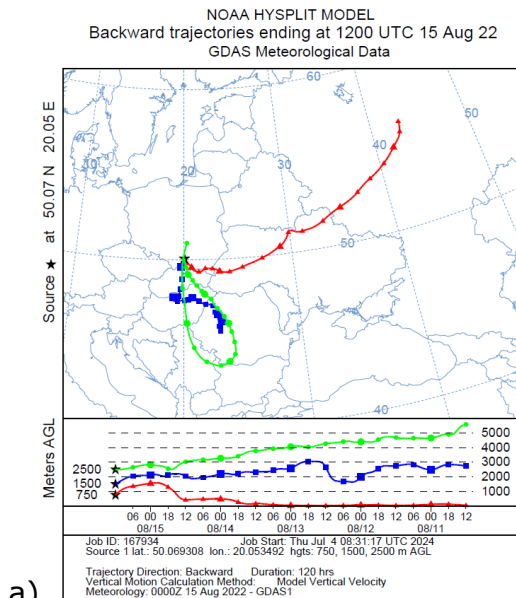
- a) W dniu 15 sierpnia 2022 roku trajektoria na wysokości 750 m pokazała ruch mas powietrza do Polski od wschodu, znad Rosji przez Ukrainę. Przez większość obszaru masy powietrza przemieszczały się blisko powierzchni terenu, przez co były poddawane lokalnym warunkom mikroklimatycznym. Trajektoria na wysokości 1500 m biegła do Polski znad obszarów Rumunii, przez Węgry i Słowację. Droga ta wskazuje na wpływ ciepłych oraz suchych mas powietrza znad południowej części Europy. W przypadku tych dwóch trajektorii obserwuje się unoszenie mas powietrza docierających do aglomeracji krakowskiej, czego następstwem była niestabilność warunków atmosferycznych. Ostatnia, najwyższa trajektoria, pokazała ruch mas z południowej części Polski z wysokości ponad 5000 m, skąd kierowały się one na południe przez Słowację, Węgry oraz Rumunię, północno-zachodnią Serbię oraz fragment północnej Bułgarii, gdzie zataczając koło skierowały się do Polski ponownie przez Rumunię, Węgry oraz Słowację. W tym przypadku również wpływ na warunki meteorologiczne w aglomeracji krakowskiej miały napływające ciepłe masy powietrza z południowej części Europy;
- b) W dniu 16 sierpnia 2022 roku trajektoria mas powietrza na wysokości 750 m biegła znad Rosji i napływała przez Ukrainę. Do 14 sierpnia, godziny 12:00 (*UTC*), masy powietrza przemieszczały się blisko powierzchni terenu, będąc pod silnym oddziaływaniem lokalnych warunków. Trasa trajektorii na wysokości 1500 m również rozpoczęła się nad Rosją, z tą różnicą, że przechodziła przez Kazachstan, ponownie Rosję oraz Ukrainę. Najwyższa trajektoria (2500 m), podobnie jak poprzednie, pokazała napływ mas znad Rosji, Kazachstanu, jeszcze raz znad Rosji oraz Ukrainy. Masy powietrza w tym przypadku poruszały się blisko powierzchni terenu, szczególnie nad Kazachstanem i piaszczystym

obszarem *The Ryn Desert*, przynosząc do Polski piasek pustylny. Trajektoria również wskazała na napływ mas suchego i ciepłego powietrza;

- c) W dniu 17 sierpnia 2022 roku masy powietrza napływały z tych samych miejsc jak w dniu poprzednim. Masy na wysokości 750 m napływały z Rosji, przez centralną Ukrainę i kierowały się w stronę centralnej Polski, skąd zaczęły napływać w stronę aglomeracji krakowskiej. Wysokości tej trajektorii były zróżnicowane, jednak już na terenie Polski masy przemieszczały się bliżej powierzchni terenu. Trajektoria na wysokości 1500 m, analogicznie do dnia poprzedniego, wskazuje na przemieszczanie się mas znad Rosji, przez Kazachstan, Rosję i Ukrainę. Również w tym przypadku masy napłynęły do Polski centralnej, skąd skierowały się na południe w stronę Balic. Ostatnia, najwyższa trajektoria pokazała napływ mas powietrza znad Rosji, przez piaszczyste obszary Kazachstanu, Rosję oraz Ukrainę. Masy powietrza napłynęły do centralnej Polski, skąd zaczęły kierować się na południe. Wszystkie trzy trajektorie wskazują napływ mas suchego i ciepłego powietrza ze wschodu, jednak wznoszące masy powietrza mogły świadczyć o bardziej niestabilnych warunkach nad aglomeracją krakowską;
- d) W dniu 18 sierpnia 2022 roku masy powietrza napływały z różnych kierunków. Na wysokości 750 m napływały z południowej części Kazachstanu, przez Uzbekistan, Turkmenistan, Morze Kaspijskie, obszar Czeczenii, Ukrainę, Białoruś i centralną Polskę, dotarły nad aglomerację krakowską. Ze względu na przepływ nad Morzem Kaspijskim, masy powietrza były wilgotne. W przypadku wysokości 1500 m masy powietrza napływały znad piaszczystych terenów we wschodniej Turcji, następnie przez Armenię, Gruzję i Rosję, obszary Czeczenii, Ukrainę, Białoruś oraz północną i centralną Polskę, dotarły nad Kraków. Kierunki tej trajektorii świadczyły o napływie suchych mas powietrza oraz możliwości zanieczyszczenia powietrza pyłami z obszarów pustynnych. Trajektoria na wysokości 2500 m zaczyna swój bieg nad granicą Francji i Włoch, blisko powierzchni terenu. Następnie przez północne Włochy, wschodnią Szwajcarię, zachodnią Austrię, południowo-wschodnie Niemcy oraz zachodnie Czechy zakreśla łuk nad Krakowem. Trajektoria oznacza napływ suchego i ciepłego powietrza z zachodu. Wszystkie trzy trajektorie świadczyły o opadaniu napływającego powietrza, a przy tym stabilizacją warunków atmosferycznych;

e) W dniu 19 sierpnia 2022 roku trajektoria na wysokości 750 m wskazuje na ruch powietrza do Polski z nad Morza Tyrreńskiego, przez Włochy, Chorwację, Węgry, Słowację. Przez Włochy masy powietrza przemieszczały się blisko powierzchni terenu i były narażone na lokalne warunki. Trajektoria jest dowodem napływu suchego powietrza z południowej Europy. Podobnie w przypadku trajektorii na wysokości 1500 m: masy powietrza napływały z nad rejonu Morza Tyrreńskiego przez Włochy, Chorwację, Węgry i Słowację. Masy powietrza w tej trajektorii przez większość czasu (do 17 sierpnia, godz. 16:00 UTC) przemieszczały się blisko powierzchni morza. Trajektoria ta świadczy o napływie stabilnych mas powietrza z południa Europy, jednak przepływ blisko powierzchni Morza Tyrreńskiego mógł przynieść również napływ wilgotnego powietrza. Najwyższa trajektoria pochodziła z nad Oceanu Atlantyckiego. Wskazuje ona na przemieszczanie się mas przez Portugalię, Hiszpanię, Morze Balearskie, Włochy, Morze Adriatyckie, Chorwację, Węgry i Słowację, zanim dotarły do Polski. Trajektoria ta wskazuje na napływ ciepłego i wilgotnego powietrza z zachodnich rejonów Europy.

Podczas epizodu od 15 sierpnia 2022 r. do 19 sierpnia 2022 r. masy powietrza napływały z kierunków wschodnich, południowych i zachodnich. Niższe trajektorie (750 m i 1500 m) najczęściej przechodziły przez obszary Rosji i Ukrainy, przynosząc suche i ciepłe powietrze. W przypadku wyższej trajektorii zmieniały się w zależności od dnia. W dniach 16 i 17 sierpnia zaobserwowano napływ mas powietrza z piaszczystych obszarów Kazachstanu, które mogły przynieść do Polski zanieczyszczenia pyłowe. W ostatnim dniu badań natomiast zaobserwowano napływ ciepłego i wilgotnego powietrza. W większości przypadków widoczny był napływ suchego i ciepłego powietrza. Masy powietrza przepływające blisko powierzchni terenu były odzwierciedleniem warunków lokalnych. Opadające masy powietrza, szczególnie 15 sierpnia oraz 18 sierpnia, wskazują na stabilne warunki meteorologiczne. Wznoszące masy powietrza, szczególnie 17 sierpnia, mogły prowadzić do mniej stabilnych warunków (większa prędkość wiatru) nad aglomeracją krakowską.



**Rys. 54.** Model *HYSPLIT* dla trajektorii wstecznych w punkcie pomiarowym Kraków, ul. Bulwarowa w 2022 roku dla: a) 15.08, b) 16.08, c) 17.08, d) 18.08, e) 19.08  
Źródło: [[www.arl.noaa.gov/trajjectory](http://www.arl.noaa.gov/trajjectory)]

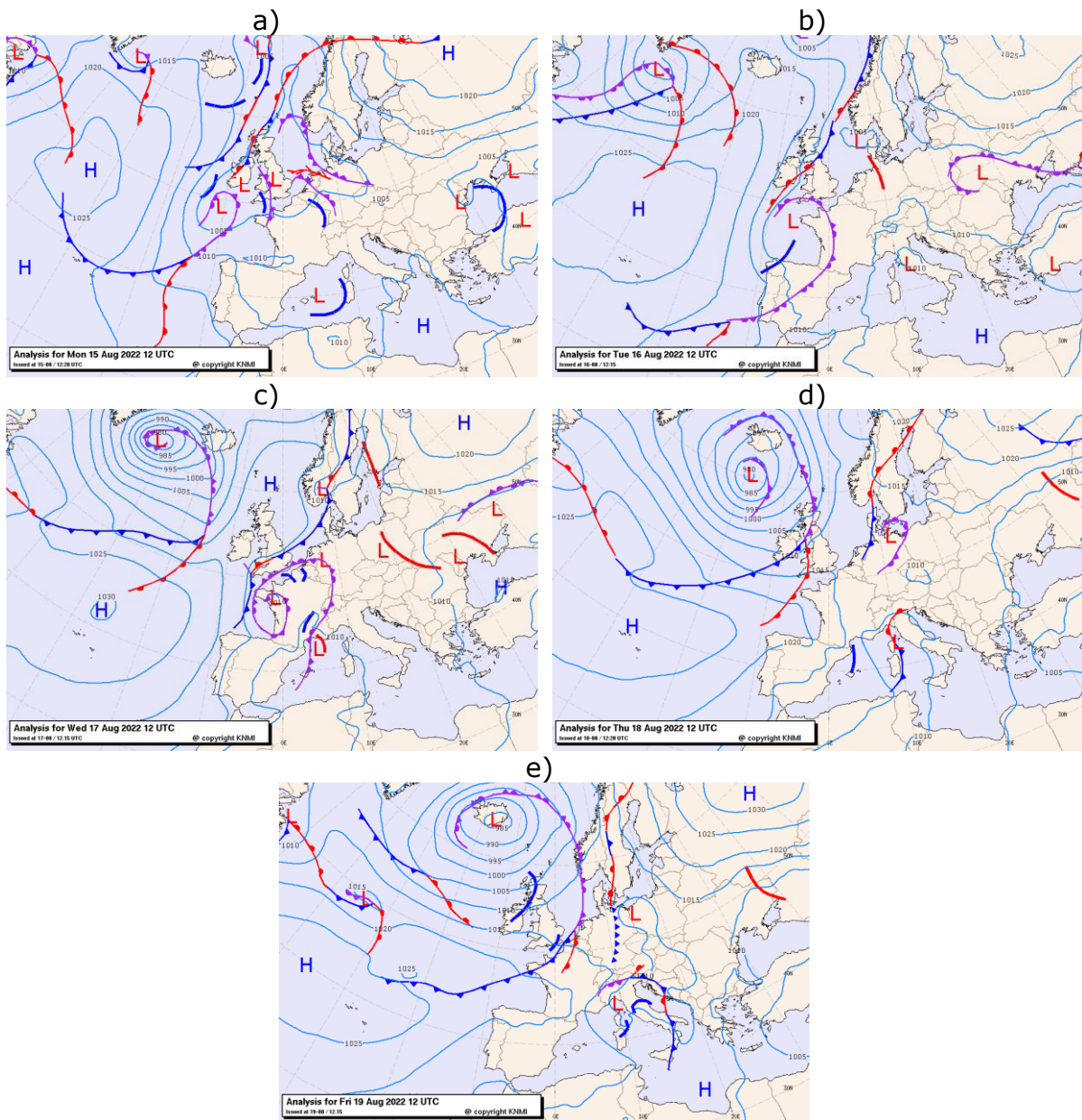
Analizując mapy synoptyczne (rysunek 55) dla okresu epizodu od 15 sierpnia 2022 roku do 19 sierpnia 2022 roku, dla godziny 12:00 (UTC), można było zaobserwować następujące warunki meteorologiczne:

- a) W dniu 15 sierpnia 2022 roku nad Europą występowały zmienne warunki atmosferyczne. Nad północnym Atlantykiem oraz nad Wielką Brytanią dominowały układy niskiego ciśnienia. Widoczne fronty okluzji świadczyły o zmiennych i wilgotnych warunkach mikroklimatycznych. W południowej Europie natomiast występował wyż baryczny, charakterystyczny dla spokojnych i suchych warunków. We wschodniej części Europy, nad zachodnią Rosją oraz nad większą częścią Ukrainy, również dominował wyż baryczny, który powodował stabilne warunki atmosferyczne. Jedynie w południowej części Ukrainy zaobserwowano zmienne fronty atmosferyczne, których efektem było wystąpienie większej prędkości wiatru. W Polsce, w tym w jej południowej części, na warunki atmosferyczne miał wpływ układ wysokiego ciśnienia, który zapewniał stabilną i suchą pogodę, jednak obserwowano zbliżające się od zachodu zmienne fronty atmosferyczne, które świadczyły o spadku temperatury i opadach deszczu w następujących dniach;
- b) W dniu 16 sierpnia 2022 roku w Europie uwidoczniły się zróżnicowane warunki meteorologiczne. W zachodniej i północnej części kontynentu występował układ niskiego ciśnienia oraz następujący front okluzji. Zjawisko to przyniosło wilgotne i zmienne warunki atmosferyczne. W zachodniej części Rosji widoczny był wciąż układ wysokiego ciśnienia i stabilne warunki pogodowe, kiedy nad Ukrainą uformował się front okluzji zmierzający na północ oraz zachód, który powodował zmienne warunki atmosferyczne, w tym opady deszczu i burze. Nad większą częścią Polski występował wyż atmosferyczny, który świadczył o stabilnej i suchej pogodzie, jednak zbliżający się od wschodu front zokludowany dolny mógł spowodować zmiany pogodowe, szczególnie w południowej części Polski;
- c) W dniu 17 sierpnia 2022 roku nad Europą utrzymywały się zróżnicowane warunki meteorologiczne. Nad zachodnią Europą miały miejsce liczne fronty atmosferyczne związane z niżami, prowadzące do opadów deszczu i zmian pogodowych. Na wschodzie Europy, w tym nad Ukrainą i Rosją, dominował niż baryczny z frontem zimnym dolnym oraz zokludowanym dolnym, który przyniósł opady deszczu. Polska w tym czasie znajdowała się pod wpływem

frontu ciepłego dolnego, przynoszącego ocieplenie, natomiast obecność niżu barycznego spowodowała większą prędkość wiatru w tym okresie;

- d) W dniu 18 sierpnia 2022 roku zaobserwowano złożoną sytuację meteorologiczną w całej Europie. W zachodniej części Europy pojawiały się zmienne fronty atmosferyczne, powodujące załamania pogodowe. Zachodnia część Europy była pod wpływem niżu barycznego, który również powodował zmienne warunki meteorologiczne. W Polsce panowały stabilne warunki meteorologiczne, bez opadów deszczu. Zwiększona prędkość wiatru w Polsce w tym czasie była spowodowana gradientem ciśnienia między niżem a wyżem barycznym;
- e) W dniu 19 sierpnia 2022 roku utrzymywały się zróżnicowane fronty nad Europą. W zachodniej części Europy dominował wyż, kształtujący ciepłą i stabilną pogodę. Nad Niemcami zaobserwowano frontogenezę frontu zimnego, który powodował zmienne warunki meteorologiczne. W południowej części kontynentu miał miejsce wyż baryczny, który zapewniał ciepłą i suchą pogodę. W Polsce widoczny był front ciepły dolny oraz układ niskiego ciśnienia, który mógł skutkować zmienną pogodą z możliwością opadów deszczu, burz i zwiększoną prędkością wiatru.

W analizowanym epizodzie od 15 sierpnia 2022 r. do 19 sierpnia 2022 r. nad Europą zaobserwowano zróżnicowane warunki meteorologiczne. Układy niskiego ciśnienia nad północnym Atlantykiem oraz Wielką Brytanią przynosiły wilgotne i zmienne warunki pogodowe, podczas gdy wyż baryczny nad południową Europą i we wschodniej części Europy przyniosły stabilną i suchą pogodę. W Polsce dominował wpływ wyżów barycznych, które zapewniały stabilne i suche warunki pogodowe, jednak późniejsze przejście niżu doprowadziło do opadów deszczu i zwiększonej prędkości wiatru. Obecność frontów zokludowanych oraz frontów ciepłych i zimnych prowadził do zróżnicowanych warunków klimatycznych nad całą Europą.



**Rys. 55.** Mapy synoptyczne dla godz. 12:00 UTC: a) 15 sierpnia 2022; b) 16 sierpnia 2022; c) 17 sierpnia 2022; d) 18 sierpnia 2022; e) 19 sierpnia 2022  
 Źródło: [www.knmi.nl/weerkaarten]

Porównanie modeli *HYSPLIT* trajektorii wstecznych mas powietrza z mapami synoptycznymi w okresie od 15 sierpnia 2022 roku do 19 sierpnia 2022 roku, pozwoliło wyciągnąć wniosek o zgodności panujących warunków. W dwóch przypadkach nad Polską dominował napływ mas powietrza z różnych kierunków: wschodu, południa i zachodu. Jest to zgodne z układami barycznymi i frontami atmosferycznymi, które były widoczne na mapach synoptycznych. Na różnych wysokościach (750 m, 1500 m, 2500 m) zidentyfikowano podobne trajektorie napływu mas powietrza, które przemieszczały się przez Rosję, Ukrainę, kraje Europy Zachodniej oraz z południa Europy. Mapy synoptyczne pokazały

dominujące układy niskiego ciśnienia nad Atlantykiem i Wielką Brytanią, przynoszące wilgotne i zmienne warunki meteorologiczne, podczas gdy wyż baryczne nad południową Europą oraz we wschodniej części Europy stabilizowały pogodę i utrzymywały wysoką temperaturę. W Polsce wyż baryczny zapewnił stabilne warunki, jednak zbliżający się front zokludowany oraz niż powodowały załamanie pogody, w tym zwiększoną prędkość wiatru. Wnioski te są zgodne z zanotowanymi warunkami mikroklimatycznymi, potwierdzonymi trajektoriami napływu mas powietrza, wskazanymi przez modele *HYSPLIT*.

#### **4.1.2. Model dyspersji zanieczyszczeń**

Modelowanie trajektorii przemieszczania się mas powietrza zapewniło dużą precyzję w ustalaniu źródeł zanieczyszczeń i kierunku ich napływu. Przy pomocy oprogramowania *HYSPLIT* wykonano model dyspersji zanieczyszczeń typu „do przodu” (*forward*) wraz z depozycją na początku trwania epizodu podwyższonego stężenia zanieczyszczeń dnia 15 sierpnia 2022 r. w punkcie pomiarowym przy ul. Bulwarowej w Krakowie (punkt pomiarowy nr 2). Stężenie 24-godzinne wyniosło  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Podjęto próbę określenia wpływu wybranych źródeł punktowych na otaczające środowisko. Przeprowadzona analiza umożliwiła uzyskanie modelu koncentracji i depozycji pyłów zawieszonych PM<sub>2,5</sub>, jak również pokazanie ruchu oraz pozycji cząstek w skali kraju na podstawie danych ilościowych emitowanych cząstek stałych. Wszystkie modele prezentują czas rozpoczęcia dyspersji zanieczyszczeń od godziny 00:00 (*UTC*). Dalsze kroki obejmowały interpretację wyników modelowania oraz określenie wielkości wpływu źródeł punktowych na teren aglomeracji krakowskiej.

#### **Model dyspersji zanieczyszczeń dla punktu pomiarowego ArcelorMittal**

Pierwszym analizowanym źródłem jest Zakład ArcelorMittal w Krakowie. Zgodnie z pozwoleniem zintegrowanym roczna wielkość emisji PM<sub>2,5</sub> w Zakładzie nie przekroczyła 24180 kg [Pozwolenie zintegrowane 2022]. Opierając się na Raporcie Zrównoważonego Rozwoju, opublikowanym przez ArcelorMittal *Poland*, stwierdzono, że emisja roczna pyłów PM<sub>2,5</sub> w 2022 roku z Zakładu wyniosła 22000 kg. Na potrzeby modelu przyjęto 24-godzinną emisję tych zanieczyszczeń (*release quantity*), wynoszącą 60,27 kg, a szybkość ich uwalniania była stała w tym okresie [Raport zrównoważonego rozwoju 2022]. Do obliczeń założono emisję z punktu

o współrzędnych: 50.08450, 20.07660, a wysokość emisji ustalono zgodnie z pozwoleniem zintegrowanym, od najniższej emisji (*release bottom*) na poziomie 9 m, do najwyższej (*release top*) na wysokości 43 m. W charakterystyce zanieczyszczenia wybrano pyły, a prędkość suchej depozycji dla panujących warunków mikroklimatycznych i suchego okresu przyjęto zgodnie z literaturą na poziomie 0,01 m/s. Ustawione parametry modelu *HYSPLIT* przedstawiono na rysunku 56.

The image shows a screenshot of the HYSPLIT model configuration interface. It is divided into several sections:

- Event Type:** Exercise - Unspecified
- Release:** Unknown Mass
- Source Location:** Lat: 50.084500 Lon: 20.076600
- Source Term:** User Entered - 60.27 kg
- Meteorology:** Archived GDAS1
- Output:** Concentration/deposition

**Model Run Details:** The archived data file (GDAS1) has data beginning at 09/15/22 0000 UTC.

**Source Term Parameters:**

- Dispersion direction:**  Forward,  Backward (Change the default start time!)
- Release starting time (UTC):** Current time: 17:24. Fields for year (22), month (08), day (15), hour (00), minute (0).
- Source latitude:** 50.084500 degrees
- Source longitude:** 20.076600 degrees (West is negative)
- Release top:** 43 meters AGL
- Release bottom:** 9 meters AGL
- Release quantity:** 60.27 kg
- Release duration:** 24 hour(s), 0 minutes

**Runtime Parameters:**

- Total duration:** 24 hour(s)
- Averaging period/Output interval:** 24 hour(s)
- Top of averaged layer:** 100 meters AGL (must be >= 100m)
- Compute center-of-mass trajectory:**  Yes,  No

**Deposition Parameters:**

- Pollutant characteristic:**  Particle,  Gas
- Dry deposition velocity (meters/second):** 0.01
- Henry's Constant for wet deposition of a gas:** 0.0
- Wet deposition of particle: In-cloud (1/s) and below-cloud (1/s):** 0.0, 0.0
- Sum deposition over total run time?:**  Yes,  No
- Radioactive decay half-life (days):** full lives, 0

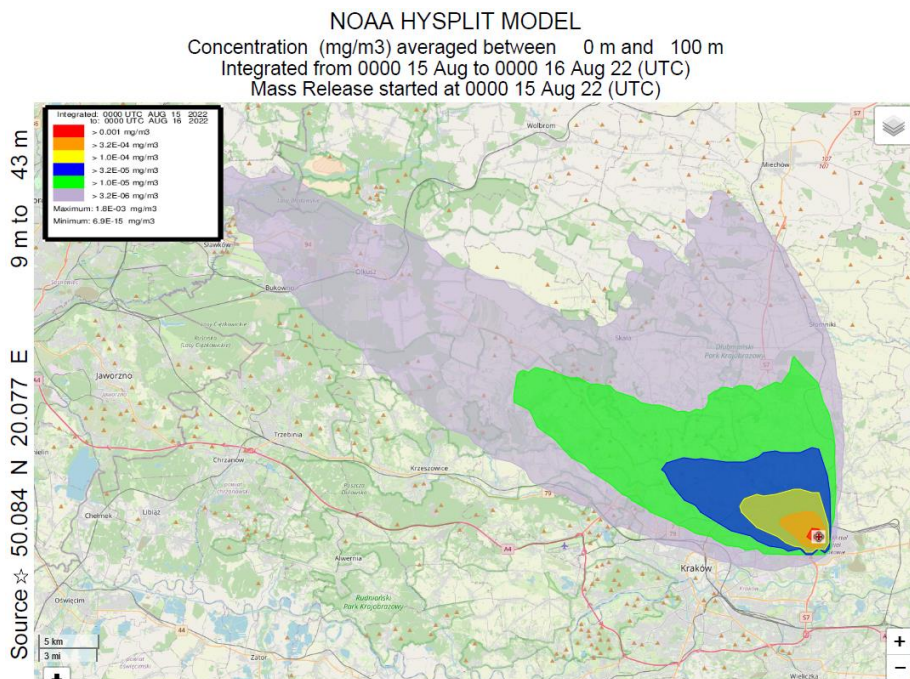
**Display Options:**

- GIS output of contours?:**  None,  Google Earth (kmz),  GIS Shapefiles
- The following options apply only to the GIF, PDF, and PS results (not Google Earth):**
- Plot resolution (dpi):** 96
- Zoom factor:** 60
- Distance circle overlay:**  None,  Auto, 4 circles spaced 10 km apart
- U.S. county borders?:**  Yes,  No
- Postscript file?:**  Yes,  No
- Create PDF file of graphics?:**  Yes,  No

**Rys. 56.** Wybrane parametry modelu *HYSPLIT* dla źródła ArcelorMittal  
Źródło: [www.arl.noaa.gov/dispersion]

Model koncentracji zanieczyszczeń na wysokości w przedziale 0-100 m n.p.t. pochodzących z Zakładu ArcelorMittal przedstawiono na rysunkach 57 oraz 58. Od 15 sierpnia 2022 roku do 16 sierpnia 2022 roku zaobserwowano przemieszczanie się i rozpraszanie zanieczyszczeń w kierunku północno-zachodnim i północnym, tworzących ścieżki o różnych stężeniach. W strefie czerwonej koncentracja pyłów PM<sub>2,5</sub> wyniosła ponad 1 µg/m<sup>3</sup>, w pomarańczowej ponad 0,32 µg/m<sup>3</sup>, a w żółtej ponad 0,1 µg/m<sup>3</sup>. W strefach zielonej, niebieskiej i szarej stężenia były odpowiednio większe niż 0,032 µg/m<sup>3</sup>, 0,01 µg/m<sup>3</sup> oraz 0,0032 µg/m<sup>3</sup>. Najwyższa zarejestrowana wartość koncentracji osiągnęła 1,8 µg/m<sup>3</sup>. Strefa czerwona znajdowała się w pobliżu Zakładu, natomiast pomarańczowa objęła swym zasięgiem Wzgórze Krzesławickie. W bezpośrednim sąsiedztwie Zakładu (w białym kwadracie na rysunku y) koncentracja osiągnęła swoją maksymalną wartość równą 1,8 µg/m<sup>3</sup>. Wraz z oddalaniem się od emitora zmniejszała się koncentracja zanieczyszczeń, osiągając kolor pomarańczowy i żółty, aż do zielonego, niebieskiego i szarego. Smuga zanieczyszczeń (kolor szary) objęła swoim zasięgiem tereny województwa śląskiego (okolice Dąbrowy Górniczej) oraz powiat

miechowski od strony północnej. Warto zaznaczyć, że punkt pomiarowy znalazł się na granicy strefy zielonej oraz szarej. Oznacza to, że w czasie emisji teren ten nie był bezpośrednio narażony na maksymalną wartość stężenia pyłów.



**Rys. 57.** Model *HYSPLIT* - koncentracja pyłów PM<sub>2,5</sub> wyemitowanych z Zakładu ArcelorMittal

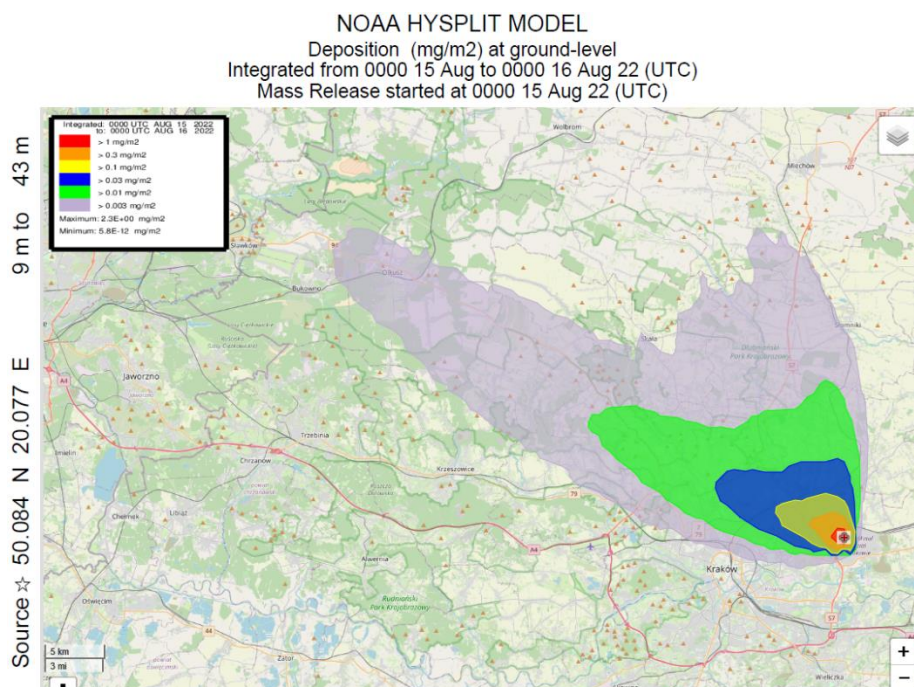
Źródło: opracowano z wykorzystaniem [[www.arl.noaa.gov/dispersion](http://www.arl.noaa.gov/dispersion)]



**Rys. 58.** Model *HYSPLIT* - koncentracja pyłów PM<sub>2,5</sub> wyemitowanych z Zakładu ArcelorMittal w powiększeniu z zaznaczonym punktem pomiarowym

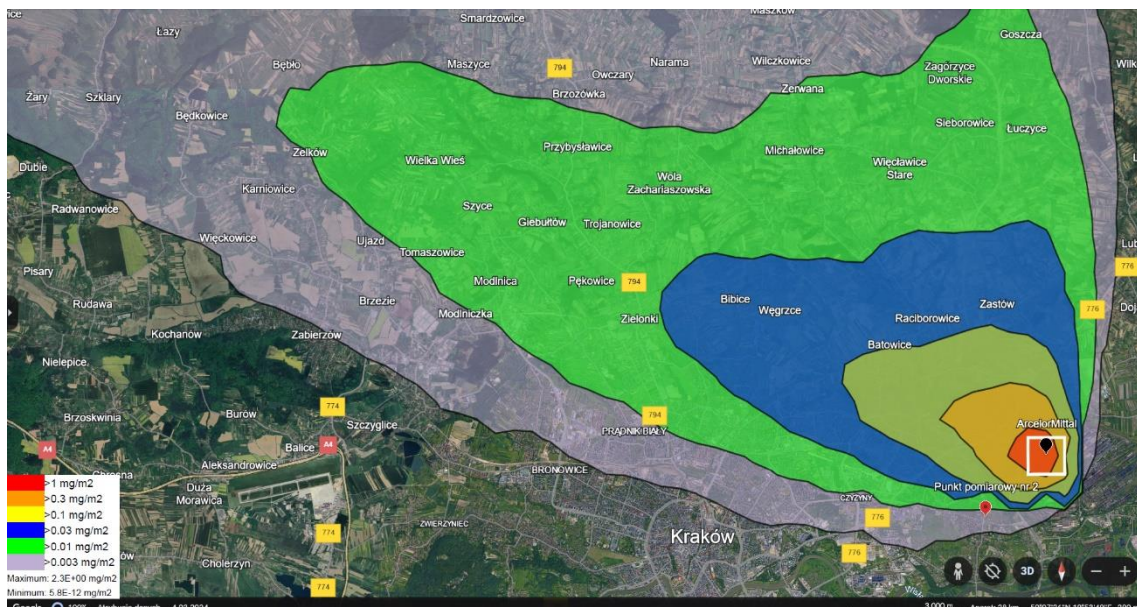
Źródło: opracowano z wykorzystaniem [[www.arl.noaa.gov/dispersion](http://www.arl.noaa.gov/dispersion); [www.earth.google.com](http://www.earth.google.com)]

Kolejnym etapem modelowania była analiza depozycji wyemitowanych pyłów z Zakładu, którą zaprezentowano na rysunkach 59 oraz 60. Również w tym przypadku można zaobserwować tendencję depozycji, analogicznie jak w przypadku koncentracji, w kierunku północno-zachodnim oraz północnym o różnym natężeniu na poziomie gruntu. Najwyższą depozycję, powyżej  $1 \text{ mg/m}^2$ , zaobserwowano w strefie czerwonej, w otoczeniu Zakładu. W bezpośrednim sąsiedztwie Zakładu (w białym kwadracie na rysunku y) depozycja osiągnęła swoją maksymalną wartość równą  $2,3 \text{ mg/m}^2$ . W strefie pomarańczowej, której wartość wynosiła ponad  $0,3 \text{ mg/m}^2$ , objęła swym zasięgiem obszar Wzgórz Krzesławickich, natomiast strefa żółta, o wartości ponad  $0,1 \text{ mg/m}^2$  zajęła Mistrzejowice i Kantorowice w Krakowie. Warto zauważyć, że strefa zielona, która znajduje się dalej niż strefa niebieska, osiągnęła większą wartość depozycji, wynikającą z warunków mikroklimatycznych oraz turbulencji w atmosferze, przenosząc cząstki w dalsze odległości. Model pokazał zarówno lokalne zanieczyszczenie, jak i szerokie rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń poza obszar aglomeracji krakowskiej. W przypadku depozycji pyłów, które wskutek adsorpcji akumulowałyby metale ciężkie na powierzchni, każda wartość jest istotna w kontekście życia i zdrowia mieszkańców.



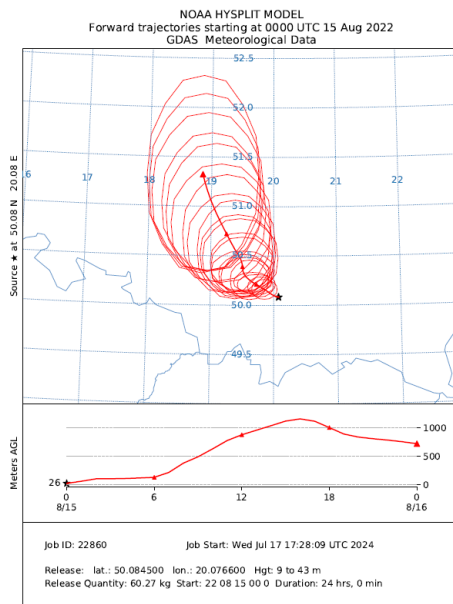
**Rys. 59.** Model *HYSPLIT* - depozycja pyłów PM<sub>2,5</sub> wyemitowanych z Zakładu ArcelorMittal

Źródło: opracowano z wykorzystaniem [[www.arl.noaa.gov/dispersion](http://www.arl.noaa.gov/dispersion)]



**Rys. 60.** Model *HYSPLIT* - depozycja pyłów PM<sub>2,5</sub> wyemitowanych z Zakładu ArcelorMittal w powiększeniu z zaznaczonym punktem pomiarowym  
 Źródło: opracowano z wykorzystaniem [[www.arl.noaa.gov/dispersion](http://www.arl.noaa.gov/dispersion);  
[www.earth.google.com](http://www.earth.google.com)]

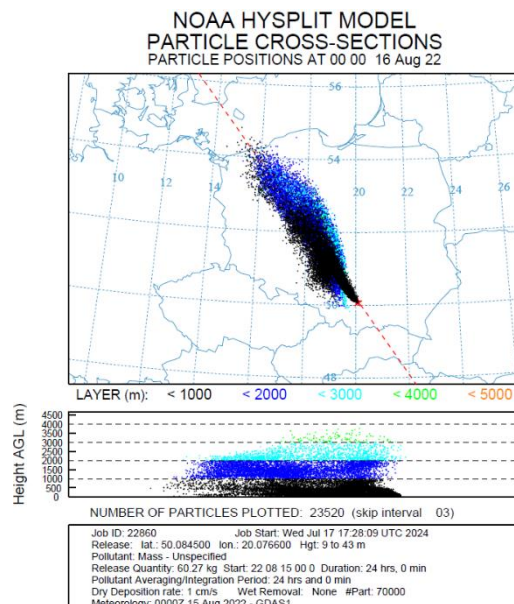
Na rysunku 61 przedstawiono 24-godzinny obraz trajektorii mas powietrza z Zakładu ArcelorMittal, z uwzględnieniem ich wysokości nad poziomem terenu. Można zaobserwować ruch mas powietrza w kierunku północno-zachodnim. Na grafie przedstawiono zmianę środka masy trajektorii w czasie. Stwierdzono, że wysokość trajektorii pozostawała jednakowa przez pierwsze 6 godzin pomiaru. Następnie nastąpił nagły wzrost toru ruchu powietrza poza obszarem aglomeracji krakowskiej. O godzinie 12:00 *UTC* trajektoria osiągnęła pułap wynoszący ponad 1000 m n.p.t. Po 24 godzinach środek masy zakończył się na wysokości ok. 800 m n.p.t. Złożone przebiegi mas powietrza znalazły odzwierciedlenie w zmiennych trajektoriach. Zjawisko wynikało ze skomplikowanych warunków mikroklimatycznych w troposferze.



**Rys. 61.** Model *HYSPLIT* - trasa trajektorii mas powietrza z Zakładu ArcelorMittal w Krakowie

Źródło: opracowano z wykorzystaniem [[www.arl.noaa.gov/dispersion](http://www.arl.noaa.gov/dispersion)]

Ważnym elementem analizy emisji pyłów z Zakładu ArcelorMittal jest przekrój cząstkowy trajektorii pyłów, który przedstawił pozycję cząstek po przebyciu 24 godzin. Zaobserwowano ruch cząstek w stronę północno-zachodnią oraz zachodnią, nad obszar Morza Bałtyckiego. Barwy na rysunku 62 zostały przypisane do wysokości zalegania cząstek pyłów. Praktycznie w całej długości zaobserwowano cząstki w kolorze czarnym, które znajdowały się na wysokości mniejszej niż 1000 m n.p.t. Im dalej przemieszczały się zanieczyszczenia, tym ich położenie wzrastało do osiągnięcia maksymalnie 3900 m n.p.t., po czym zaczęły opadać. Warto zaznaczyć, że w modelu uwzględniono 23520 cząstki pyłów PM<sub>2,5</sub>, a dla klarownego zobrazowania i uproszczenia dyspersji prezentowana jest co trzecia cząstka. Na podstawie symulacji zaobserwowano dynamiczny pionowy rozkład położenia cząstek, który jest szczególnie pomocny w określaniu wpływu źródeł punktowych na otoczenie.



**Rys. 62.** Model *HYSPLIT* – przekrój cząstkowy trajektorii pyłów z Zakładu ArcelorMittal w Krakowie

Źródło: opracowano z wykorzystaniem [[www.arl.noaa.gov/dispersion](http://www.arl.noaa.gov/dispersion)]

## Model dyspersji zanieczyszczeń dla punktu pomiarowego Elektrociepłownia Kraków

Drugim analizowanym źródłem punktowym jest Elektrociepłownia Kraków. Roczna wielkość emisji pyłu ogółem wynosi  $6 \times 10^5$  kg. Na potrzeby modelu, z uwagi na okres letni, została przyjęta 23-godzinna emisja zanieczyszczeń (*release quantity*) wynosząca 137 kg, a szybkość ich uwalniania była stała w tym okresie. Do obliczeń założono emisję z punktu o współrzędnych: 50.05389, 20.00741, a wysokość emisji 120 m ustalono zgodnie z pozwoleniem zintegrowanym [Pozwolenie zintegrowane 2020]. W charakterystyce zanieczyszczenia wybrano pyły, a prędkość suchej depozycji dla panujących warunków mikroklimatycznych i suchego okresu przyjęto zgodnie z literaturą na poziomie 0,01 m/s. Ustawione parametry modelu *HYSPLIT* przedstawiono na rysunku 63.

**Event Type:** Exercise - Unspecified  
**Release:** Unknown Mass  
**Source Location:** Lat: 50.053890 Lon: 20.007410  
**Source Term:** User Entered - 10.24 mass  
**Meteorology:** Archived GDAS1  
**Output:** Concentration/deposition

**Model Run Details**  
The archived data file (GDAS1) has data beginning at 09/15/22 0000 UTC.

**Source Term Parameters**

Dispersion direction:  Forward  Backward (Change the default start time!) [More info](#)

Release starting time (UTC): year: 22 month: 08 day: 15 hour: 00 minute: 0 [More info](#)

Source latitude: 50.053890 (degrees) [More info](#)

Source longitude: 20.007410 (degrees (West is negative)) [More info](#)

Release top: 120 meters AGL [More info](#)

Release bottom: 170 meters AGL [More info](#)

Release quantity: 137 kg [More info](#)

Release duration: 23 hour(s) 0 minutes [More info](#)

**Runtime Parameters**

Total duration: 24 hour(s) [More info](#)

Averaging period/Output interval: 24 hour(s) [More info](#)

Top of averaged layer: 100 meters AGL (must be >= 100m) [More info](#)

Compute center-of-mass trajectory:  Yes  No [More info](#)

**Deposition Parameters**

Pollutant characteristic:  Particle  Gas [More info](#)

Dry deposition velocity (meters/second): 0.01 [More info](#)

Henry's Constant for wet deposition of a gas: 0.0 [More info](#)

Wet deposition of particle: In-cloud (1/s) and below-cloud (1/s): 0.0 0.0 [More info](#)

Sum deposition over total run time?:  Yes  No [More info](#)

Radioactive decay half-life (days): half-lives: 0 [More info](#)

**Display Options**

GIS output of contours?  None  Google Earth (kmz)  GIS Shapefiles [More info](#)

The following options apply only to the GIF, PDF, and PS results (not Google Earth)

Plot resolution (dpi): 96 [More info](#)

Zoom factor: 60 [More info](#)

Distance circle overlay:  None  Auto  4 circles spaced 10 km apart [More info](#)

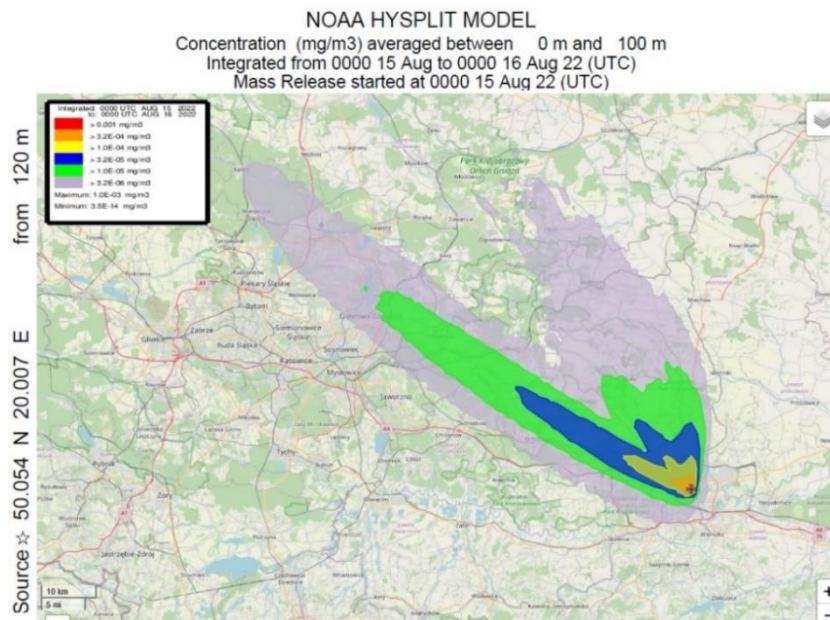
U.S. county borders?  Yes  No [More info](#)

Postscript file?  Yes  No [More info](#)

Create PDF file of graphics?  Yes  No [More info](#)

**Rys. 63.** Wybrane parametry modelu *HYSPLIT* dla źródła Elektrociepłownia Kraków  
 Źródło: [www.arl.noaa.gov/dispersion]

Model koncentracji zanieczyszczeń na wysokości w przedziale 0-100 m n.p.t. pochodzących z Elektrociepłowni Kraków został zaprezentowany na rysunkach 64 oraz 65. W dniach 15-16 sierpnia 2022 roku zaobserwowano przemieszczanie się i rozpraszanie zanieczyszczeń w kierunku północno-zachodnim i północnym, tworzących ścieżki o różnych stężeniach. W strefie czerwonej koncentracja pyłów PM<sub>2,5</sub> wyniosła ponad 1 µg/m<sup>3</sup>, w pomarańczowej ponad 0,32 µg/m<sup>3</sup>, a w żółtej ponad 0,1 µg/m<sup>3</sup>. W strefach zielonej, niebieskiej i szarej stężenia były odpowiednio większe niż 0,032 µg/m<sup>3</sup>, 0,01 µg/m<sup>3</sup> oraz 0,0032 µg/m<sup>3</sup>. Maksimum znajdujące się w bezpośrednim otoczeniu Zakładu (biały kwadrat) wyniosło 1 µg/m<sup>3</sup>. Strefa czerwona objęła emitery oraz część Zakładu, natomiast w strefie pomarańczowej znalazł się fragment dzielnicy Czyżyny oraz Grzegórzki. W tym przypadku również wraz z oddalaniem się od emitora zmniejszała się koncentracja zanieczyszczeń, osiągając kolor pomarańczowy i żółty, aż do zielonego, niebieskiego i szarego. Smuga zanieczyszczeń (kolor szary) objęła swoim zasięgiem tereny województwa śląskiego (okolice miasta Kalety) oraz powiat zawierciański (w tym Park Krajobrazowy Orlich Gniazd) od strony północnej. Na dalekie rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń miała wpływ wysokość emitora na poziomie 120 m. Warto zaznaczyć, że tego dnia punkt pomiarowy znalazł się poza granicą koncentracji pyłów.



**Rys. 64.** Model *HYSPLIT* - koncentracja pyłów PM<sub>2,5</sub> wyemitowanych z Elektrociepłowni Kraków

Źródło: opracowano z wykorzystaniem [[www.arl.noaa.gov/dispersion](http://www.arl.noaa.gov/dispersion)]

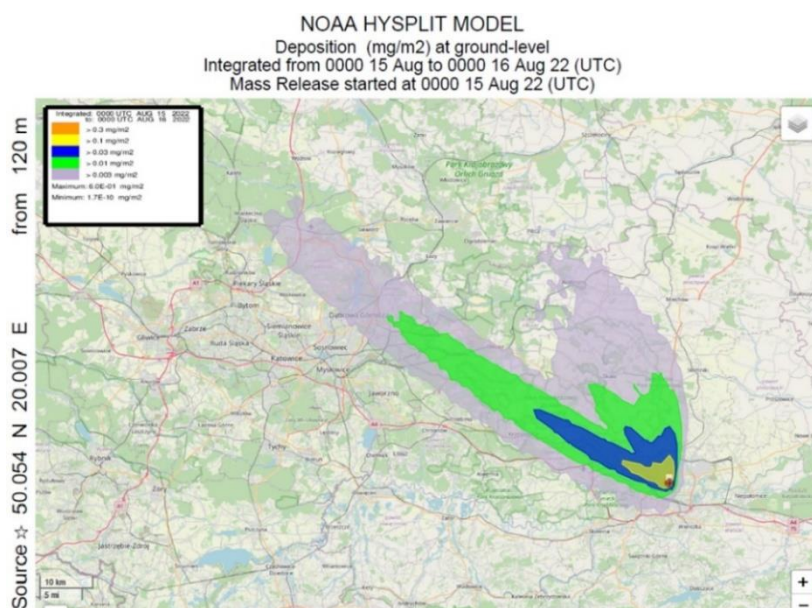


**Rys. 65.** Model *HYSPLIT* - koncentracja pyłów PM<sub>2,5</sub> wyemitowanych z Elektrociepłowni Kraków w powiększeniu z zaznaczonym punktem pomiarowym

Źródło: opracowano z wykorzystaniem [[www.arl.noaa.gov/dispersion](http://www.arl.noaa.gov/dispersion); [www.earth.google.com](http://www.earth.google.com)]

Depozycję wyemitowanych pyłów z Elektrociepłowni Kraków zaprezentowano na rysunkach 66 oraz 67. W kierunku północno-zachodnim oraz północnym zaobserwowano depozycję o różnym natężeniu na poziomie gruntu, analogicznie jak w przypadku koncentracji. Najwyższą depozycję, powyżej 0,3 mg/m<sup>2</sup>, zanotowano w strefie pomarańczowej, w otoczeniu Zakładu oraz na północ w stronę dzielnicy Czyżyny. W bezpośrednim sąsiedztwie Zakładu depozycja osiągnęła swoją maksymalną wartość równą 0,6 mg/m<sup>2</sup>. Strefa żółta (powyżej 0,1

mg/m<sup>2</sup>) na północy objęła część Mistrzejowic, a na północnym zachodzie fragment Starego Miasta, Prądnika Białego i Bronowic. Strefa niebieska (powyżej 0,03 mg/m<sup>2</sup>) oraz zielona (powyżej 0,01 mg/m<sup>2</sup>) objęły większą część Krakowa oraz okoliczne miejscowości na północ oraz na północny zachód od Krakowa. Model pokazał zarówno lokalne zanieczyszczenie, jak i szerokie rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń poza obszar aglomeracji krakowskiej. Również w tym przypadku punkt pomiarowy tego dnia znalazł się poza granicą depozycji pyłów.



**Rys. 66.** Model *HYSPLIT* - depozycja pyłów PM<sub>2,5</sub> wyemitowanych z Elektrociepłowni Kraków

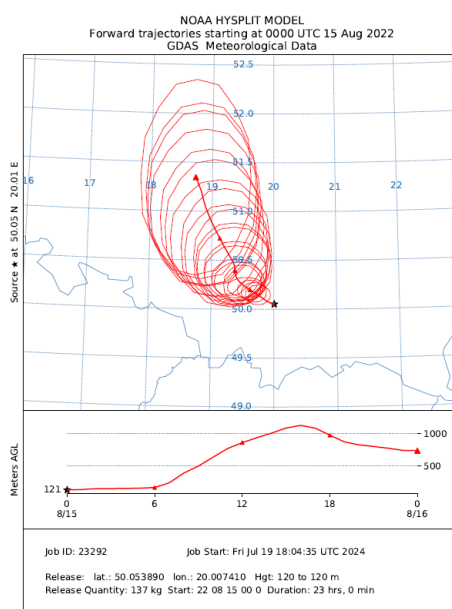
Źródło: opracowano z wykorzystaniem [[www.arl.noaa.gov/dispersion](http://www.arl.noaa.gov/dispersion)]



**Rys. 67.** Model *HYSPLIT* - depozycja pyłów PM<sub>2,5</sub> wyemitowanych z Elektrociepłowni Kraków w powiększeniu z zaznaczonym punktem pomiarowym

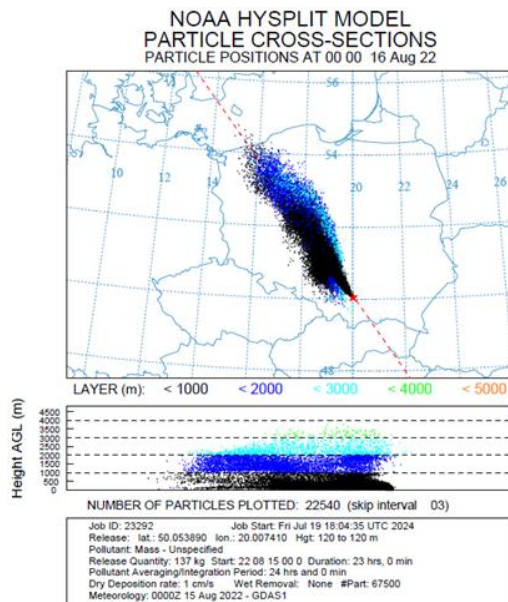
Źródło: opracowano z wykorzystaniem [[www.arl.noaa.gov/dispersion](http://www.arl.noaa.gov/dispersion); [www.earth.google.com](http://www.earth.google.com)]

Na rysunku 68 przedstawiono 24-godzinny obraz trajektorii mas powietrza z Elektrociepłowni Kraków, z uwzględnieniem ich wysokości nad poziomem terenu. Można zaobserwować ruch mas powietrza w kierunku północno-zachodnim. Trajektorie mas powietrza utrzymywały się na stałej wysokości emisji do godziny 6:00. Następnie, podobnie jak w przypadku poprzedniego Zakładu, zaobserwowano nagły pionowy tor ruchu powietrza poza obszarem aglomeracji krakowskiej. O godzinie 12:00 (UTC) trajektoria osiągnęła pułap wynoszący ponad 1000 m n.p.t. Po 24 godzinach środek masy zakończył się na wysokości ok. 800 m n.p.t. Złożone przebiegi mas powietrza znajdują odzwierciedlenie w zmiennych trajektoriach. Zjawisko wynikało ze skomplikowanych warunków mikroklimatycznych w troposferze.



**Rys. 68.** Model *HYSPLIT* - trasa trajektorii mas powietrza z Elektrociepłowni Kraków  
 Źródło: opracowano z wykorzystaniem [[www.arl.noaa.gov/dispersion](http://www.arl.noaa.gov/dispersion)]

Analiza emisji pyłów z Elektrociepłowni Kraków pokazała przekrój cząstkowy trajektorii pyłów, uwzględniający pozycję cząstek po przebyciu 24 godzin (rysunek 69). Zaobserwowano ruch cząstek w kierunku północno-zachodnim oraz zachodnim (nad obszar Morza Bałtyckiego) analogicznie, jak w przypadku Zakładu ArcelorMittal. Pomimo innych parametrów emitora cząstki osiągnęły maksymalnie ok. 3900 m, po czym zaczęły opadać. Praktycznie w całej długości trajektorii można zaobserwować cząstki w kolorze czarnym, które znajdowały się na wysokości mniejszej niż 1000 m n.p.t. W modelu uwzględniono 22540 cząstki pyłów PM<sub>2,5</sub>, a dla klarownego zobrazowania i uproszczenia dyspersji prezentowana jest co trzecia cząstka.



**Rys. 69.** Model *HYSPLIT* – przekrój cząstkowy trajektorii pyłów z Elektrociepłowni Kraków

Źródło: opracowano z wykorzystaniem [[www.arl.noaa.gov/dispersion](http://www.arl.noaa.gov/dispersion)]

## Model dyspersji zanieczyszczeń dla punktu pomiarowego Ekospalarnia Kraków

Trzecim analizowanym źródłem punktowym jest Ekospalarnia Kraków. Roczna wielkość emisji pyłu ogółem wynosi 13,01 Mg i spełnia wymogi pozwolenia zintegrowanego. Na potrzeby modelu została przyjęta roczna emisja pyłu PM<sub>2,5</sub>, wynosząca 3,90 Mg na rok. Zgodnie z informacją na temat czasu pracy emitatorów przyjęto 23-godzinną emisję zanieczyszczeń (*release quantity*), wynoszącą 10,24 kg, zaś szybkość ich uwalniania była stała w tym okresie. Do obliczeń założono emisję z punktu o współrzędnych: 50.05819, 20.08119, a wysokość emisji 70 m ustalono zgodnie z pozwoleniem zintegrowanym [Pozwolenie zintegrowane 2021]. W charakterystyce zanieczyszczenia wybrano pyły, natomiast prędkość suchej depozycji dla panujących warunków mikroklimatycznych i suchego okresu przyjęto zgodnie z literaturą na poziomie 0,01 m/s. Ustawione parametry modelu *HYSPLIT* przedstawiono na rysunku 70.

<b>Event Type:</b>	Exercise - Unspecified
<b>Release:</b>	Unknown
<b>Source Location:</b>	Lat: 50.058190 Lon: 20.081190
<b>Source Term:</b>	User Entered - 1 mass
<b>Meteorology:</b>	Archived GDAS1
<b>Output:</b>	Concentration/deposition

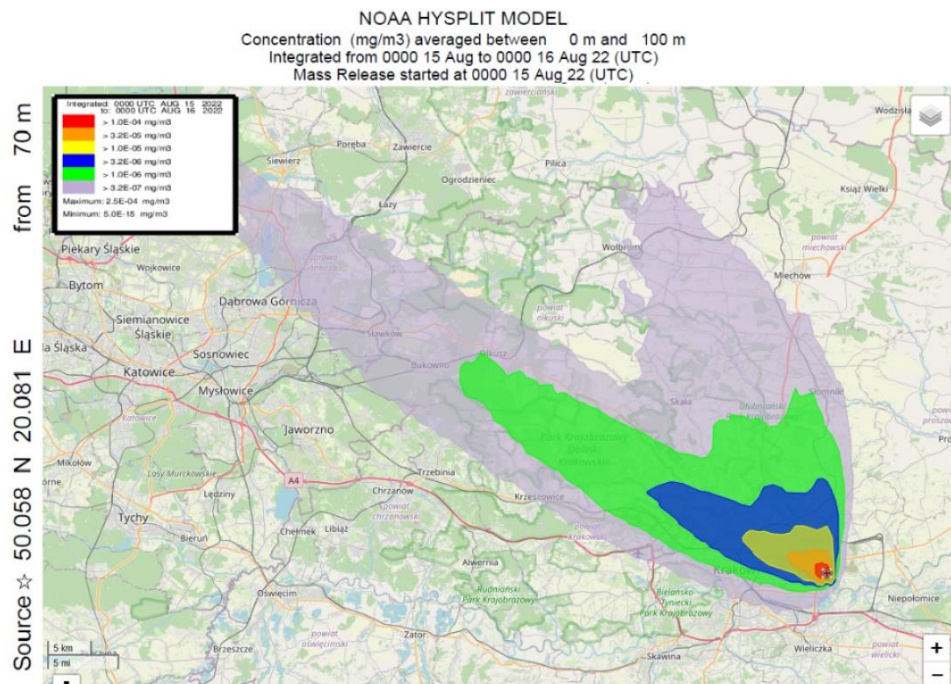
**Model Run Details**  
The archived data file (GDAS1) has data beginning at 08/15/22 0000 UTC.

<b>Source Term Parameters</b>	
Dispersion direction:	<input checked="" type="radio"/> Forward <input type="radio"/> Backward (Change the default start time!) <a href="#">More info</a>
Release starting time (UTC):	Current time: 18:57 year: 22 month: 08 day: 15 hour: 00 minute: 0 <a href="#">More info</a>
Source latitude:	50.058190 degrees <a href="#">More info</a>
Source longitude:	20.081190 degrees (West is negative) <a href="#">More info</a>
Release top:	70 meters AGL <a href="#">More info</a>
Release bottom:	70 meters AGL <a href="#">More info</a>
Release quantity:	10.24 kg <a href="#">More info</a>
Release duration:	23 hour(s) 0 minutes <a href="#">More info</a>
<b>Runtime Parameters</b>	
Total duration:	24 hour(s) <a href="#">More info</a>
Averaging period/Output interval:	24 hour(s) <a href="#">More info</a>
Top of averaged layer:	100 meters AGL (must be >= 100m) <a href="#">More info</a>
Compute center-of-mass trajectory:	<input checked="" type="radio"/> Yes <input type="radio"/> No <a href="#">More info</a>

<b>Deposition Parameters</b>	
Pollutant characteristic:	<input checked="" type="radio"/> Particle <input type="radio"/> Gas <a href="#">More info</a>
Dry deposition velocity (meters/second):	0.01 <a href="#">More info</a>
Henry's Constant for wet deposition of a gas:	0.0 <a href="#">More info</a>
Wet deposition of particle: In-cloud (1/s) and below-cloud (1/s):	0.0 0.0 <a href="#">More info</a>
Sum deposition over total run time?:	<input checked="" type="radio"/> Yes <input type="radio"/> No <a href="#">More info</a>
Radioactive decay half-life (days):	half-life: 0 <a href="#">More info</a>
<b>Display Options</b>	
GIS output of contours?	<input type="radio"/> None <input checked="" type="radio"/> Google Earth (kmz) <input type="radio"/> GIS Shapefiles <a href="#">More info</a>
The following options apply only to the GIF, PDF, and PS results (not Google Earth)	
Plot resolution (dpi):	96 <a href="#">More info</a>
Zoom factor:	60 <a href="#">More info</a>
Distance circle overlay:	<input checked="" type="radio"/> None <input type="radio"/> Auto <input type="radio"/> 4 circles spaced 10 km apart <a href="#">More info</a>
U.S. county borders?	<input type="radio"/> Yes <input checked="" type="radio"/> No <a href="#">More info</a>
Postscript file?	<input type="radio"/> Yes <input checked="" type="radio"/> No <a href="#">More info</a>
Create PDF file of graphics?	<input checked="" type="radio"/> Yes <input type="radio"/> No <a href="#">More info</a>

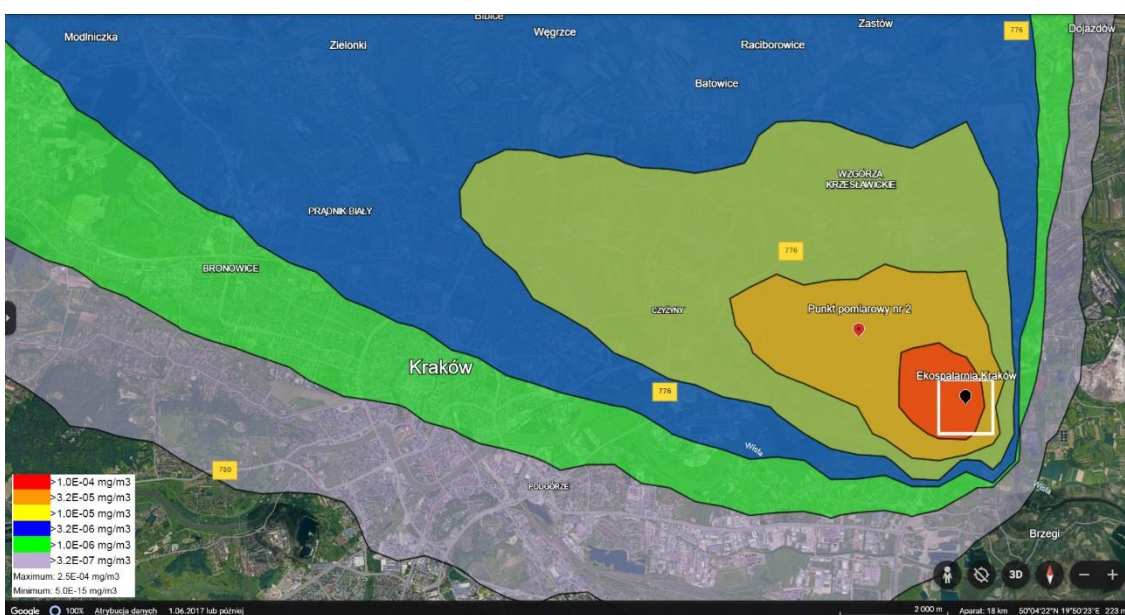
**Rys. 70.** Wybrane parametry modelu *HYSPLIT* dla źródła Ekospalarnia Kraków  
Źródło: [www.arl.noaa.gov/dispersion]

Model koncentracji zanieczyszczeń na wysokości w przedziale 0-100 m n.p.t. pochodzących z Ekospalarni Kraków został zaprezentowany na rysunkach 71 oraz 72. W dniach 15-16 sierpnia 2022 roku zaobserwowano przemieszczanie się i rozpraszanie zanieczyszczeń w kierunku północno-zachodnim i północnym, tworzących ścieżki o różnych stężeniach. W strefie czerwonej koncentracja pyłów PM<sub>2,5</sub> wyniosła ponad 0,1 µg/m<sup>3</sup>, w pomarańczowej ponad 0,032 µg/m<sup>3</sup>, a w żółtej ponad 0,01 µg/m<sup>3</sup>. W strefach zielonej, niebieskiej i szarej stężenia były odpowiednio większe niż 0,0032 µg/m<sup>3</sup>, 0,001 µg/m<sup>3</sup> oraz 0,00032 µg/m<sup>3</sup>. Maksimum znajdujące się w bezpośrednim otoczeniu Zakładu (biały kwadrat) wyniosło 0,25 µg/m<sup>3</sup>. Strefa czerwona objęła Zakład oraz jego otoczenie. Strefa pomarańczowa objęła obszar Krakowa do ul. Bieńczyckiej, a od północnej części al. Solidarności. Właśnie w tej strefie tego dnia znalazł się punkt pomiarowy nr 2. Ponadto strefa żółta objęła część północno-wschodniego Krakowa (Wzgórza Krzesławickie, Prądnik Czerwony). W tym przypadku również wraz z oddalaniem się od emitora zmniejszała się koncentracja zanieczyszczeń, co pokazują kolory pomarańczowy i żółty, aż do zielonego, niebieskiego i szarego. Smuga zanieczyszczeń (kolor szary) objęła swoim zasięgiem województwo śląskie, tereny na północ od Dąbrowy Górniczej, a także obszary na wschód i północ od Wolbromia. Na dalekie rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń miała wpływ znacząca wysokość emitora (70 m).



**Rys. 71.** Model *HYSPLIT* - koncentracja pyłów PM<sub>2,5</sub> wyemitowanych z Ekospalarni Kraków

Źródło: opracowano z wykorzystaniem [[www.arl.noaa.gov/dispersion](http://www.arl.noaa.gov/dispersion)]

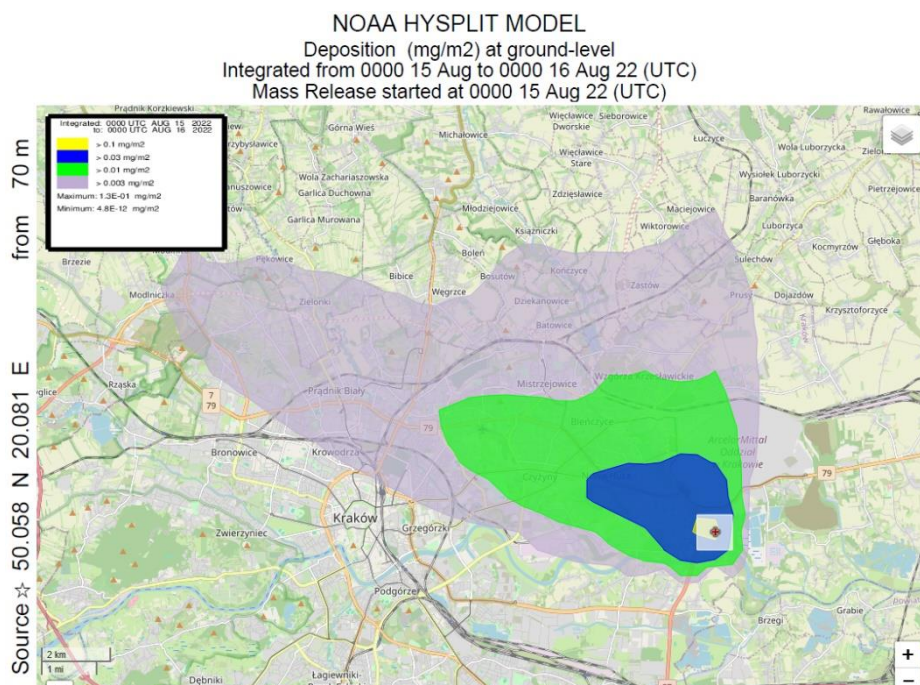


**Rys. 72.** Model *HYSPLIT* - koncentracja pyłów PM<sub>2,5</sub> wyemitowanych z Ekospalarni Kraków w powiększeniu z zaznaczonym punktem pomiarowym

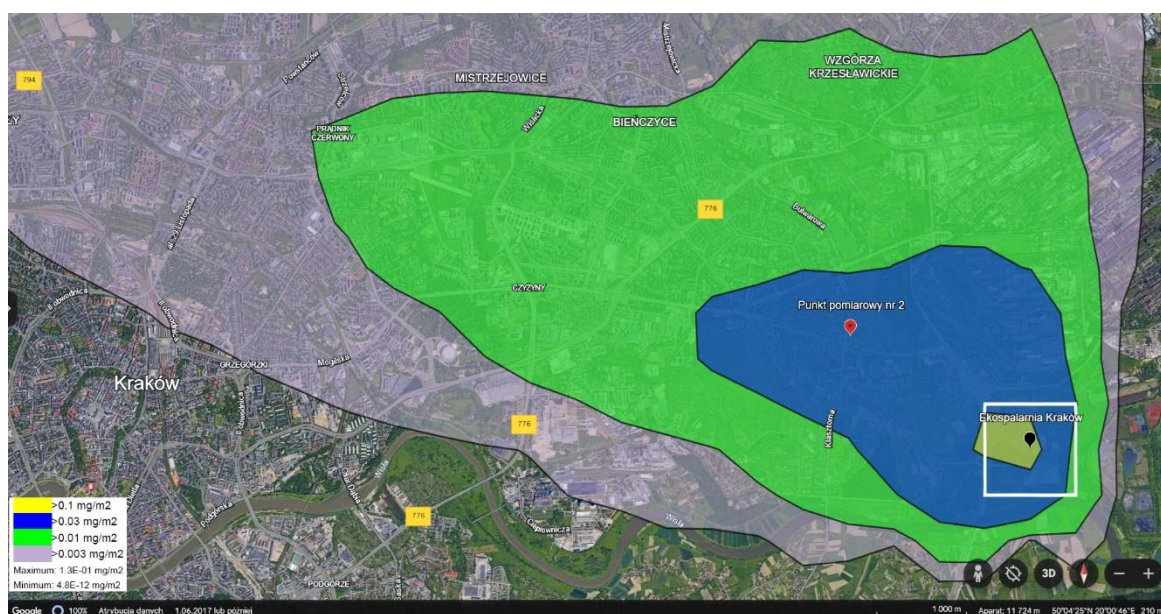
Źródło: opracowano z wykorzystaniem [[www.arl.noaa.gov/dispersion](http://www.arl.noaa.gov/dispersion); [www.earth.google.com](http://www.earth.google.com)]

Depozycję wyemitowanych pyłów z Ekospalarni Kraków zaprezentowano na rysunkach 73 oraz 74. Zaobserwowano depozycję, analogicznie jak w przypadku koncentracji, w kierunku północno-zachodnim oraz północnym o różnym natężeniu na poziomie gruntu. Najwyższą depozycję, powyżej 0,1 mg/m<sup>2</sup>, zanotowano w strefie żółtej, w otoczeniu Zakładu. Strefa niebieska, w której znalazł się punkt pomiarowy nr 2 (powyżej 0,03 mg/m<sup>2</sup>), oraz zielona (powyżej 0,01 mg/m<sup>2</sup>) objęła

większą wschodnią i północno-wschodnią część Krakowa. Strefa szara (powyżej 0,003 mg/m<sup>2</sup>) objęła wschodnią i północną część Krakowa oraz miejscowości w północnej części aglomeracji. Model wskazał na większą lokalną depozycję pyłów w obrębie Krakowa niż na innych obszarach aglomeracji.



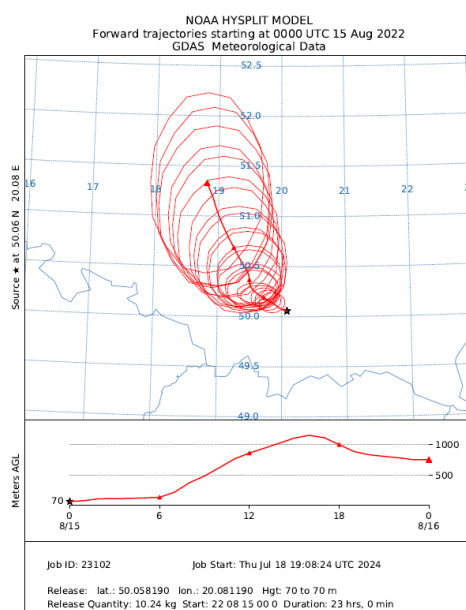
**Rys. 73.** Model *HYSPLIT* - depozycja pyłów PM<sub>2,5</sub> wyemitowanych z Ekospalarni Kraków  
Źródło: opracowano z wykorzystaniem [[www.arl.noaa.gov/dispersion](http://www.arl.noaa.gov/dispersion)]



**Rys. 74.** Model *HYSPLIT* - depozycja pyłów PM<sub>2,5</sub> wyemitowanych z Ekospalarni Kraków w powiększeniu z zaznaczonym punktem pomiarowym  
Źródło: opracowano z wykorzystaniem [[www.arl.noaa.gov/dispersion](http://www.arl.noaa.gov/dispersion); [www.earth.google.com](http://www.earth.google.com)]

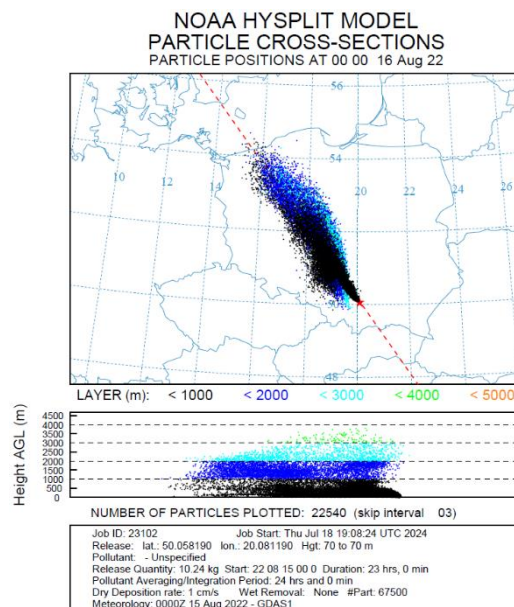
Na rysunku 75 przedstawiono 24-godzinny obraz trajektorii mas powietrza z Ekospalarni Kraków, z uwzględnieniem ich wysokości nad poziomem terenu.

Można zaobserwować ruch mas powietrza w kierunku północno-zachodnim. Podobnie jak w poprzednich przypadkach, trajektorie mas powietrza utrzymywały się na stałej wysokości emisji do godziny 6:00. Następnie zaobserwowano nagły wzrost toru ruchu powietrza poza obszarem aglomeracji krakowskiej. O godzinie 12:00 (UTC) trajektoria osiągnęła pułap wynoszący ponad 1000 m n.p.t. Po 24 godzinach środek masy zakończył się na wysokości ok. 800 m n.p.t. Złożone przebiegi mas powietrza znajdują odzwierciedlenie w zmiennych trajektoriach. Wskazywało to na złożone warunki meteorologiczne w troposferze.



**Rys. 75.** Model *HYSPLIT* - trasa trajektorii mas powietrza z Ekospalarni Kraków  
Źródło: opracowano z wykorzystaniem [[www.arl.noaa.gov/dispersion](http://www.arl.noaa.gov/dispersion)]

Analiza emisji pyłów z Ekospalarni Kraków pokazał przekrój cząstkowy trajektorii pyłów, uwzględniający pozycję cząstek po przebyciu 24 godzin (rysunek 76). Zaobserwowano ruch cząstek w kierunku północno-zachodnim oraz zachodnim (nad północno-zachodnią część Polski). Pomimo innych parametrów emitora cząstki osiągnęły maksymalnie ok. 3900 m, po czym zaczęły opadać. Praktycznie w całej długości trajektorii można zaobserwować cząstki w kolorze czarnym, które znajdowały się na wysokości mniejszej niż 1000 m n.p.t. W modelu uwzględniono 22540 cząstki pyłów PM<sub>2,5</sub>, a dla klarownego zobrazowania i uproszczenia dyspersji prezentowana jest co trzecia cząstka.



**Rys. 76.** Model *HYSPLIT* – przekrój cząstkowy trajektorii pyłów z Ekospalarni Kraków  
Źródło: opracowano z wykorzystaniem [[www.arl.noaa.gov/dispersion](http://www.arl.noaa.gov/dispersion)]

Oprogramowanie *HYSPLIT* pozwoliło na modelowanie dyspersji zanieczyszczeń oraz depozycji pyłów zawieszonych PM<sub>2,5</sub> emitowanych z analizowanych źródeł punktowych, takich jak ArcelorMittal, Elektrociepłownia Kraków i Ekospalarnia Kraków. Wyniki pokazały zarówno lokalne, jak i regionalne (poza aglomerację) rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń. Najwyższe stężenia zanieczyszczeń były notowane w bezpośrednim sąsiedztwie zakładów, a koncentracja zmniejszała się wraz z odległością od emitatorów. Analiza wykazała, że największe stężenie pyłów PM<sub>2,5</sub> zostało odnotowane w przypadku Zakładu ArcelorMittal, gdzie w strefie czerwonej osiągnęło wartość 1,8 µg/m<sup>3</sup>. Równocześnie najwyższą depozycję pyłów (2,3 mg/m<sup>2</sup>) zarejestrowano w bezpośrednim otoczeniu tego zakładu. Smugi zanieczyszczeń z wszystkich trzech źródeł przemysłowych rozprzestrzeniały się głównie w kierunku północno-zachodnim oraz północnym, pomimo różnych wysokości emitatorów. Zasięg emisji obejmował tereny poza Krakowem, docierając do obszarów województwa śląskiego. Lokalne warunki meteorologiczne, w tym prędkość wiatru, miały znaczący wpływ na rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń. Zaobserwowano, że cząstki, które osiągały większe wysokości (od 2000 m n.p.t. do 3900 m n.p.t.), były bardziej rozproszone, co sugerowało wpływ zmiennych warunków atmosferycznych, takich jak prądy wstępujące, na ich dyspersję.

## **Rozdział V. Propozycja działań proekologicznych**

Przeprowadzone w dysertacji badania wykazały, że problem zanieczyszczenia powietrza pyłami zawieszonymi PM<sub>2,5</sub> jest aktualny i pilny. Źródła antropogeniczne, np. duże zakłady przemysłowe, mają negatywny wpływ na środowisko, toteż konieczne jest informowanie społeczeństwa o zagrożeniach i podjętych działaniach naprawczych. Ruch społeczny „Krakowski Alarm Smogowy” to znakomity przykład tworzenia mechanizmów i procedur współpracy organizacji ekologicznych ze społeczeństwem. Stowarzyszenie skupia młodych, prężnych ludzi, świadomych katastrofalnej jakości powietrza w Krakowie. W zespole pracują eksperci: ekolodzy, sozolodzy, energetycy, ekonomiści, lekarze. Raporty z badań przekazywane są mieszkańcom Małopolski oraz władzom miasta i województwa. Organizacja podejmuje starania o podjęcie efektywnych działań w celu poprawy jakości powietrza w aglomeracji krakowskiej.

Zaproponowane przez autora rozwiązania proekologiczne, rozpowszechnienie kampanii edukacyjno-informacyjnych, promocja fitoremediacji, prowadzenie dzielnicowego monitoringu i kontroli, mają na celu podniesienie poziomu świadomości ekologicznej lokalnej społeczności.

### **Kampanie edukacyjno-informacyjne**

Opracowanie skutecznej kampanii wymaga czasu, zaangażowania, starannego planowania oraz zasobów finansowych. Zgodnie z obowiązującymi przepisami gminy mają fundusze na organizację proekologicznych przedsięwzięć. Edukacja ekologiczna łączy w sobie kluczowe aspekty przedstawione na rysunku 76. Obejmują one: zdobywanie wiedzy, świadomość problemów środowiskowych, rozwój umiejętności społecznych i emocjonalnych, motywację, zaangażowanie obywatelskie oraz kompetencje akademickie. Te elementy wspólnie pomagają sprostać wyzwaniom ekologicznym. Konieczne jest również dostosowanie treści kampanii do wieku odbiorców. Dostęp do edukacji jest warunkowany wieloma czynnikami, takimi jak poziom wykształcenia, status na rynku pracy, przynależność do danej kategorii zawodowej, wiek, płeć oraz posiadane umiejętności. Cele edukacji ekologicznej koncentrują się na zrównoważonym zarządzaniu zasobami środowiska. Do istotnych elementów edukacji należą

podstawy etyczne, odpowiedzialność wobec środowiska, nauka holistycznego myślenia, które uwzględnia zarówno potrzeby ludzkie, jak i środowiskowe. Nie można zapominać o wprowadzaniu nowoczesnych technologii ochrony środowiska oraz o międzynarodowych inicjatywach na rzecz jego ochrony. Wyzwaniem jest edukacja dorosłych, osób starszych i biernych zawodowo. Ich system wartości jest już silnie ukształtowany, a ograniczone możliwości rozwoju i pogłębiania wiedzy utrudniają zmianę ich postaw. Przerwa w edukacji osób dorosłych może osłabić zdolności intelektualne i motywację do dalszego rozwoju. Skutecznym sposobem na wprowadzenie nowych nawyków i podejścia do ochrony środowiska jest aktywne angażowanie społeczeństwa w działania proekologiczne [Aleksander 2015; Eurydice 2015; Sobczyk 2000; [www.sigmaearth.com](http://www.sigmaearth.com)].



**Rys. 77.** Potrzeba i znaczenie edukacji ekologicznej  
Źródło: [[www.sigmaearth.com](http://www.sigmaearth.com)]

Przykładem kampanii edukacyjno-informacyjnej skierowanej do mieszkańców aglomeracji krakowskiej jest opracowanie bezpłatnej aplikacji mobilnej. Głównym zadaniem takiego narzędzia edukacyjnego jest informowanie o rodzajach zanieczyszczeń, sposobach walki z zanieczyszczeniami, środkach ochrony osobistej (stosowanie maseczek antysmogowych, nabycie oczyszczacza powietrza, hodowla roślin doniczkowych posiadających właściwości oczyszczające powietrze). Aplikacja opiera się na lokalizacji i dostarcza danych na temat działalności przemysłowej oraz szczegółowych informacji o źródłach i rodzajach emisji w bliskim otoczeniu. Aplikacja może być zintegrowana z systemem monitoringu jakości powietrza, podając w czasie rzeczywistym informacje o poziomach zanieczyszczeń. Użytkownicy otrzymują ostrzeżenia o przekroczeniu dopuszczalnych norm zanieczyszczeń powietrza danego dnia, w tym o poziomach informowania i alarmowym, a także informacje o wprowadzaniu bezpłatnej komunikacji miejskiej. Poprzez swoje funkcje aplikacja może pełnić kluczową rolę

w poprawie kondycji zdrowotnej mieszkańców (przeprowadzone badania wykazały, że w bliskim sąsiedztwie emitorów notuje się zwiększoną koncentrację pyłów zawieszonych i obecność w nich metali ciężkich, będących prekursorami poważnych problemów zdrowotnych. Elementami angażującymi do korzystania z aplikacji są quizy ekologiczne z punktacją i rankingami. Aplikacja powinna również zawierać funkcję powiadomień o wydarzeniach związanych z ochroną środowiska, np. akcja „Sprzątanie Świata”. W ofercie proponuje się wprowadzenie funkcji zgłaszania niepokojących źródeł emisji zanieczyszczeń odpowiednim służbom.

## **Fitoremediacja**

Zanieczyszczenie metalami ciężkimi stanowi poważny problem globalny i lokalny. Metale ciężkie zanieczyszczają glebę, wodę i powietrze, utrzymując się w ekosystemach przez bardzo długi czas. Wysokie stężenia metali mają toksyczny wpływ na organizmy żywe. Dobrym pomysłem jest fitoremediacja, czyli wykorzystanie roślin do oczyszczania środowiska. Jak wspomniano w części teoretycznej, fitonocydy uwalniane przez rośliny są w stanie zredukować szkodliwe zanieczyszczenia w powietrzu. Ponadto rośliny mają zdolność do akumulacji szkodliwych związków, a przy tym oczyszczania środowiska [Grobela, Kacprzak 2010; Schumacher 2005; Suchocka, Gawłowska 2019].

Tam gdzie zanieczyszczenie powietrza i degradacja środowiska są szczególnie problematyczne, a tereny zielone zabierane są pod rozrastające się miasta, istotną rolę stanowią parki miejskie, w których rośliny pełnią ważną funkcję w pochłanianiu pyłów i gazów. Roślinność obecna w parkach działa jak naturalny filtr. Dodatkowym atutem roślinności jest pozytywny wpływ na samopoczucie i jakość życia mieszkańców. Istotą działań naprawczych jest promowanie roślin bogatych w fitonocydy, a przede wszystkim sadzenie ich w rejonach dużych zakładów przemysłowych. Rośliny rosnące w zanieczyszczonych obszarach miejskich wykazują odporność na trudne warunki środowiskowe, takie jak zanieczyszczenia powietrza, gleby, sól drogową, mróz, suszę oraz chemiczne zanieczyszczenia gleby. Wprowadzanie takich gatunków do przestrzeni miejskich jest kluczowym elementem strategii zielono-niebieskiej infrastruktury, która łączy zieloną infrastrukturę (roślinność) i niebieską infrastrukturę (zbiorniki wodne, systemy retencyjne). Pozwala ona tworzyć ekologiczne i zrównoważone przestrzenie miejskie. Wśród gatunków drzew oczyszczających powietrze należy

wymienić: topolę (*Populus tremuloides*), wierzbę krzewiastą (*Salix viminalis*, *Salix viminalis x Salix schwerinie*), miłorząb (*Ginkgo biloba*), lipę drobnolistną (*Tilia cordata*) [Ciapa, Śliwka 2022; Grobelak, Kacprzak 2010; Schumacher 2005; Suchocka, Gawłowska 2019].

## **Ochrona i monitoring powietrza**

Skuteczna ochrona środowiska wymaga wdrażania spójnych programów ochrony powietrza. Wskazana jest regularna identyfikacja i inwentaryzacja źródeł emisji powierzchniowej, prowadzona przez urzędy miast i gmin. W przypadku źródeł szczególnie zanieczyszczających konieczne jest zastosowanie nowoczesnych technologii filtracyjnych. Należy wdrożyć regulacje ograniczające emisje z tych źródeł, jak również zapewnić odpowiednią kontrolę, monitorowanie oraz raportowanie [Najwyższa Izba Kontroli 2018]. Pozwala to na bieżące informowanie społeczeństwa o przekroczeniach norm jakości powietrza oraz umożliwia szybką reakcję na zagrożenia. Taka komunikacja zapewnia mieszkańcom dostęp do niezbędnych informacji dotyczących poziomów zanieczyszczeń i pozwala na podjęcie działań zapobiegających negatywnym skutkom zdrowotnym. Na podstawie przeprowadzonych studiów literaturowych stwierdzono brak wymaganych regulacji prawnych. Te obecnie obowiązujące nie określają dopuszczalnych poziomów emisji niektórych pierwiastków, takich jak arsen i kadm, w ramach pozwoleń zintegrowanych dla zakładów przemysłowych. Prowadzi to do niekontrolowanej emisji tych toksycznych substancji i do narażenia zdrowia mieszkańców.

Zaproponowane metody proekologiczne wymagają skoordynowanych działań. Propozycje obejmują edukację społeczeństwa poprzez kampanie informacyjno-edukacyjne oraz aplikację mobilną, promowanie fitoremediacji jako naturalnego filtra przeciwdziałającemu zanieczyszczeniom, a także regularny monitoring jakości powietrza, który pozwala mieszkańcom na ciągły dostęp do aktualnych informacji oraz umożliwia podejmowanie szybkich działań w czasie epizodów przekraczania norm. Przytoczone przykłady działań proekologicznych podkreślają naszą odpowiedzialność za stan środowiska.

## Podsumowanie i wnioski

W związku z wieloletnim rozwojem przemysłu, transportu i produkcji energii aglomeracja krakowska boryka się z problemem wysokiego poziomu zanieczyszczenia powietrza pyłami zawieszonymi. Potwierdzają to raporty Europejskiej Agencji Środowiska, które wskazują, że stężenia pyłów PM<sub>2,5</sub> regularnie przekraczają dopuszczalne normy ustalone przez Światową Organizację Zdrowia. Problem jest pogłębiony specyficznymi czynnikami mikroklimatycznymi, warunkami topograficznymi i nierozsądną polityką urbanizacyjną w aglomeracji krakowskiej.

Rozpoznanie, śledzenie i analiza literatury specjalistycznej na temat prowadzonych badań i obserwacji w tematyce pyłowych zanieczyszczeń powietrza przekonał autora dysertacji o aktualności problematyki oraz użyteczności i zasadności prowadzenia własnych badań i doświadczeń.

### **Analizy teoretyczne i badania empiryczne pozwoliły na wyciągnięcie następujących wniosków z rozprawy.**

1. Spośród różnych rodzajów źródeł zanieczyszczeń pyłowych ważne znaczenie mają obiekty punktowe. Odpowiednio wybrane lokalizacje punktów pomiarowych są pierwszoplanowe w ocenie wpływu źródeł punktowych na mikroklimat. Kryteria wyboru lokalizacji obejmowały: cel pomiarów, warunki terenowe, bezpieczeństwo i łatwy dostęp oraz zgodność z obowiązującymi przepisami. Zdecydowano o następującej lokalizacji punktów pomiarowych: Nr 1. Balice, ul. Na Lotnisko; źródło punktowe: Międzynarodowy Port Lotniczy Kraków-Balice; Nr 2. Kraków, ul. Bulwarowa; źródła punktowe: ArcelorMittal Poland, Ekospalarnia Kraków, Elektrociepłownia Kraków. Cel nr 1 „Wybór punktowych źródeł zanieczyszczeń pyłowych PM<sub>2,5</sub> w aglomeracji krakowskiej” został osiągnięty.
2. Pomiaru ilościowego pyłu zawieszonego PM<sub>2,5</sub> dokonano metodą automatyczną. W 2021 r., czyli w okresie pandemii COVID-19, zaobserwowano stabilizację i spadek stężenia PM<sub>2,5</sub> w porównaniu do poprzednich lat, co było wynikiem zmniejszonej aktywności przemysłowej. W okresie pomiarowym

najwyższe stężenie godzinne pyłów PM<sub>2,5</sub> (40 µg/m<sup>3</sup>) zarejestrowano 26 marca 2021 r. na punkcie pomiarowym nr 1 (Kraków-Balice) oraz najwyższe stężenie 24-godzinne 26 września 2022 r. na punkcie pomiarowym nr 2 (ArcelorMittal, Ekospalarnia Kraków, Elektrociepłownia Kraków) (24,2 µg/m<sup>3</sup>). W okresie pomiarowym średnie 24-godzinne stężenie PM<sub>2,5</sub> zostało przekroczone 15 razy (norma WHO 15 µg/m<sup>3</sup>). Cel nr 2 „Analiza ilościowa pyłów zawieszonych” został osiągnięty.

3. Analiza jakościowa pyłu zawieszonego PM<sub>2,5</sub> została przeprowadzona za pomocą spektrometru emisyjnego atomowego z plazmą argonową wzbudzaną indukcyjnie – ICP AES 4200. W pyłe stwierdzono obecność pierwiastków: nikiel, arsen, kadm i ołów. Wahania stężeń ołowiu były związane ze zmiennymi warunkami meteorologicznymi i mikroklimatycznymi. Zauważono brak pozwolenia zintegrowanego dla emisji arsenu i kadmu w Zakładzie ArcelorMittal oraz niezachowanie standardów środowiskowych dla emisji arsenu w Elektrociepłowni Kraków. Istnieje pilna potrzeba aktualizacji regulacji w celu zahamowania niekontrolowanej emisji zanieczyszczeń i zminimalizowania ich negatywnego wpływu na środowisko. Cel nr 3. „Analiza jakościowa próbek pyłów” został osiągnięty.
4. Pomiarów grawimetrycznych zapylenia zestawiono z danymi meteorologicznymi: wilgotność powietrza, zachmurzenie, temperatura, prędkość i kierunek wiatru. Analiza eksponuje znaczenie monitorowania kierunku i prędkości wiatru jako zasadniczych czynników w ocenie czystości powietrza i w planowaniu działań prewencyjnych. Stwierdzono, że osobliwe parametry mikroklimatyczne wpływają na częstość epizodów wysokich stężeń zanieczyszczeń pyłowych. Podczas antycyklonów, w obecności klina wyżu, w warunkach inwersji temperaturowej warstwa chłodnego powietrza, ułożona pod ciepłą warstwą, utrudnia pionowe mieszanie mas i zmniejsza stopień dyspersji zanieczyszczeń. Wiatr z kierunków północnego i północno-zachodniego transportuje zanieczyszczenia z Elektrociepłowni, wiatr wschodni przemieszcza masy powietrza z Ekospalarni oraz Zakładu ArcelorMittal. Inne zanieczyszczenia napływają z zachodu, w tym z Portu Lotniczego. Cel nr 4 „Rozpoznanie warunków meteorologicznych w aglomeracji krakowskiej” został osiągnięty.

5. Analiza regresji wielorakiej wskazuje kluczowe czynniki meteorologiczne dla predykcji stężeń pyłów w powietrzu. Parametr: prędkość wiatru w najlepszy sposób opisuje zmiany parametru: stężenie pyłów. Wyższe temperatury generują wyższe poziomy zanieczyszczeń, wyższe ciśnienie nieznacznie wpływa na zmniejszenie stężenia pyłu, większa prędkość wiatru przyspiesza dyspersję zanieczyszczeń. Równanie regresji ma postać:

$$c_{PM2,5} = 179,368 + 0,229 * t - 0,160 * p - 0,544 * v_w$$

Gdzie:  $c_{PM2,5}$  – stężenie pyłu  $PM_{2,5}$ ,  $\mu g/m^3$ ;  $t$  – temperatura powietrza,  $^{\circ}C$ ;  
 $p$  – ciśnienie powietrza, hPa;  $v_w$  – prędkość wiatru, km/h.

Analiza wariancji ANOVA zweryfikowała statystyczną istotność modelu wpływu zmiennych niezależnych na zmienną zależną ( $p < 0,001$ ). Wysoka wartość testu F wskazuje, że model regresji dobrze wyjaśnia zmienność stężenia pyłu  $PM_{2,5}$ . Cel nr 5 „Wykrywanie współzależności czynników meteorologicznych i stopnia zapylenia. Obliczenie modelu regresji wielorakiej” został osiągnięty.

6. Predykcja dyspersji zanieczyszczeń jest bardzo trudnym zadaniem ze względu na nagłe, gwałtowne i skomplikowane zjawiska pogodowe. Do identyfikacji tras ruchu mas powietrza wykorzystano model *NOAA HYSPLIT*, bazujący na wstecznych trajektoriach mas powietrza. Grupowanie trajektorii o podobnych cechach umożliwiło niezawodną interpretację szlaków transportu zanieczyszczeń, kierunków napływu i wielkości ich depozycji, jak również precyzyjne definiowanie ryzykownych lub skrajnych sytuacji pogodowych. Zaimplementowano model dyspersji zanieczyszczeń typu „*Forward*” z depozycją na początku trwania epizodu podwyższonego stężenia zanieczyszczeń. Model pokazuje zarówno depozycje lokalne, jak i poza obrębem aglomeracji krakowskiej. Wyniki symulacji zostały zweryfikowane poprzez analizę map synoptycznych Europy w przypadkach podwyższonych stężeń zanieczyszczeń pyłowych. Stwierdzono, że za sprawą implementacji modelu można zapobiegać epizodom zagrożeń zdrowia i życia mieszkańców. Cel nr 6 „Przeprowadzenie symulacji transportu mas powietrza i zanieczyszczeń w aglomeracji krakowskiej” został osiągnięty.

7. Mieszkańcom aglomeracji krakowskiej zaproponowano działania proekologiczne, prewencyjne oraz zaradcze w celu poprawy stanu wiedzy o jakości powietrza. Opracowano instrumenty rozpoznania krytycznych sytuacji środowiskowych i narzędzia informowania społeczeństwa o zagrożeniach. Powszechność cyfrowych narzędzi w monitorowaniu środowiska skłania ku kontynuacji dostępności i użyteczności platform edukacyjnych dla społeczeństwa. Stanowi to punkt wyjścia do promowania indywidualnej odpowiedzialności za środowisko.

Realizacja wszystkich zadań badawczych zapewniła osiągnięcie celów i potwierdzenie tezy, iż istnieje możliwość predykcji zmian mikroklimatu aglomeracji krakowskiej przy wykorzystaniu modelowania trajektorii mas powietrza, dyspersji i depozycji zanieczyszczeń pyłowych PM<sub>2,5</sub> pochodzących z punktowych źródeł przemysłowych.

Przeprowadzone badania i analizy utwierdziły autora rozprawy o konieczności dalszych obserwacji, pomiarów i dociekań na temat współzależności stopnia zapylenia powietrza i parametrów mikroklimatu oraz zjawisk pogodowych.

Modele cyfrowe powinny służyć nauce jako instrumenty rozpoznawania incydentów podwyższonych stężeń zanieczyszczeń. Modyfikacje modeli mogą mieć zastosowanie w ochronie środowiska, meteorologii i klimatologii, a także w lokalnej polityce środowiskowej przy tworzeniu strategii prewencyjnych podczas krytycznych sytuacji środowiskowych.

W obliczu nieuchronnych zmian klimatycznych konieczne są dogłębne analizy globalnych i lokalnych zjawisk oraz poszukiwanie zależności i prawidłowości. Skorzysta na tym przyroda i skorzystamy my sami, ponieważ to za sprawą przyrody środowisko człowieka jest stabilne. To jest nowa współczesna postawa światopoglądowa i przesłanie etyczne naszej cywilizacji.

## Spis tabel

<b>Tabela 1.</b> Klasyfikacja stanów termicznej oraz dynamicznej równowagi atmosfery według Pasquilla i Gifforda .....	34
<b>Tabela 2.</b> Wartości współczynnika aerodynamicznej szorstkości terenu $z_0$ .....	38
<b>Tabela 3.</b> Prędkość suchego osadzania cząstek PM <sub>2,5</sub> i PM <sub>10</sub> w różnych okresach .....	41
<b>Tabela 4.</b> Minimalna liczba stałych stanowisk pomiarowych wymagana na potrzeby oceny jakości powietrza .....	54
<b>Tabela 5.</b> Etapy mineralizacji .....	71
<b>Tabela 6.</b> Wyliczona wartość mierzonego sygnału dla ołowiu, kadmu, arsenu oraz niklu .....	74
<b>Tabela 7.</b> Wyliczone wartości wykrywalności urządzenia .....	76
<b>Tabela 8.</b> Wyliczone wartości wykrywalności metody .....	77
<b>Tabela 9.</b> Średnie wartości wybranych parametrów klimatu w Krakowie i Balicach (2019–2023) .....	82
<b>Tabela 10.</b> Dopuszczalna roczna wartość emisji zanieczyszczeń z Zakładu .....	86
<b>Tabela 11.</b> Podstawowe surowce i produkty wykorzystywane w Elektrociepłowni .....	88
<b>Tabela 12.</b> Dopuszczalna roczna wielkość emisji zanieczyszczeń z Zakładu ....	89
<b>Tabela 13.</b> Dopuszczalna łączna wartość emisji zanieczyszczeń w ciągu roku dla całej instalacji ZTPO .....	91
<b>Tabela 14.</b> Statystyki opisowe stężenia pyłu PM <sub>2,5</sub> i zmiennych mikroklimatycznych .....	115
<b>Tabela 15.</b> Współczynnik korelacji liniowej Pearsona dla zmiennych mikroklimatycznych i pyłu PM <sub>2,5</sub> .....	118
<b>Tabela 16.</b> Wyniki analizy regresji wielokrotnej dla zmiennej zależnej: stężenie pyłu PM <sub>2,5</sub> .....	119
<b>Tabela 17.</b> Wyniki analizy wariancji (ANOVA) dla modelu regresji wyjaśniającego zależność stężenia pyłu PM <sub>2,5</sub> od zmiennych mikroklimatycznych .....	120
<b>Tabela 18.</b> Wyniki analizy regresji wielokrotnej dla stężenia pyłu PM <sub>2,5</sub> .....	121

## Spis rysunków

<b>Rys. 1.</b> Zanieczyszczenie środowiska według modelu Holdgate'a .....	21
<b>Rys. 2.</b> Porównanie wielkości cząstek pyłów zawieszonych .....	22
<b>Rys. 3.</b> Rodzaje smogu oraz ich skład.....	29
<b>Rys. 4.</b> Mechanizm chorób płuc wywołanych przez pył ultradrobny .....	30
<b>Rys. 5.</b> Rodzaje smug kominowych: a) pętlowa, b) stożkowa, c) wentylacyjna, d) trasująca, e) zanieczyszczająca.....	33
<b>Rys. 6.</b> Schemat wpływu wzgórza na rozprzestrzenianie się smugi zanieczyszczeń .....	39
<b>Rys. 7.</b> Rozprzestrzenianie się pyłu w atmosferze .....	42
<b>Rys. 8.</b> Podstawowe założenia modelu gaussowskiego smugi zanieczyszczeń ..	44
<b>Rys. 9.</b> Schemat standardowego pobornika .....	56
<b>Rys. 10.</b> Schemat głowicy poboru pyłów dla przepływu 2,3 m <sup>3</sup> /h .....	57
<b>Rys. 11.</b> Schemat miernika <i>Met One Bam-1020</i> .....	58
<b>Rys. 12.</b> Schemat miernika <i>TOEM</i> .....	59
<b>Rys. 13.</b> Schemat miernika typu <i>OPC</i> .....	60
<b>Rys. 14.</b> Schemat działania aparatu <i>ICP-AES</i> .....	61
<b>Rys. 15.</b> Pyłomierz automatyczny, model <i>WP6130</i> .....	65
<b>Rys. 16.</b> Pobornik powietrza, model <i>MicroPNS</i> , typ <i>LVS16/17</i> .....	66
<b>Rys. 17.</b> Robotyczny system pomiarowy <i>RB 2.4Y.F</i> do ważenia filtrów .....	68
<b>Rys. 18.</b> Filtry o różnym poziomie zanieczyszczenia, poddane ekspozycji pyłu zawieszzonego PM <sub>2,5</sub> .....	68
<b>Rys. 19.</b> Spektrometr emisyjny atomowy z plazmą argonową wzbudzaną indukcyjnie – <i>ICP AES 4200</i> .....	69
<b>Rys. 20.</b> Procedura analizy filtrów PM <sub>2,5</sub> .....	69
<b>Rys. 21.</b> Zastosowane roztwory: nadtlenek wodoru 30%, kwas azotowy (V) 65% .....	70
<b>Rys. 22.</b> Roztwór z filtrami w naczyniach .....	70
<b>Rys. 23.</b> Sączenie filtrów po mineralizacji .....	72
<b>Rys. 24.</b> Krzywe kalibracyjne dla: ołowiu (Pb), kadmu (Cd), arsenu (As) oraz niklu (Ni) .....	73
<b>Rys. 25.</b> Krakowski Obszar Metropolitalny na tle województwa małopolskiego. 79	
<b>Rys. 26.</b> Kontrast fizjonomiczny miasta – Łąki Nowohuckie w Krakowie .....	80
<b>Rys. 27.</b> Stężenia PM <sub>2,5</sub> w 2021 roku w odniesieniu do rocznej wartości dopuszczalnej UE oraz rocznego poziomu wytycznych <i>WHO</i> .....	83

<b>Rys. 28.</b> Stężenia PM <sub>2,5</sub> w 2022 roku w odniesieniu do rocznej wartości dopuszczalnej UE oraz rocznego poziomu wytycznych <i>WHO</i> .....	83
<b>Rys. 29.</b> Zakład ArcelorMittal .....	84
<b>Rys. 30.</b> Elektrociepłownia Kraków .....	87
<b>Rys. 31.</b> Ekospalarnia Kraków .....	90
<b>Rys. 32.</b> Port Lotniczy Kraków-Balice .....	92
<b>Rys. 33.</b> Liczba pasażerów Portu Lotniczego Kraków-Balice w poszczególnych miesiącach w 2021 roku .....	93
<b>Rys. 34.</b> Lokalizacja punktów pomiarowych: 1. Balice, ul. Na Lotnisko; 2. Kraków, ul. Bulwarowa. Źródła punktowe: A. Międzynarodowy Port Lotniczy Kraków-Balice; B. ArcelorMittal Poland; C. Ekospalarnia Kraków; D. Elektrociepłownia Kraków	95
<b>Rys. 35.</b> Archiwum pogodowe w czasie kampanii pomiarowej w Balicach w 2021 r. z zaznaczonym początkiem pomiarów .....	96
<b>Rys. 36.</b> Archiwum pogodowe w czasie kampanii pomiarowej w Balicach w 2021 r. z zaznaczonym końcem pomiarów .....	97
<b>Rys. 37.</b> Róża wiatru w dni pomiarowe w miejscu pomiarowym Balice .....	98
<b>Rys. 38.</b> Archiwum pogodowe z zaznaczoną kampanią pomiarową w Krakowie, ul. Bulwarowa w 2022 r. ....	99
<b>Rys. 39.</b> Róża wiatru w dni pomiarowe w miejscu pomiarowym Kraków .....	101
<b>Rys. 40.</b> Średnie godzinowe wartości danych pomiarowych GIOŚ oraz własne dla okresu od 17 marca do 20 kwietnia w latach 2017–2023 (godzina 12.00).....	103
<b>Rys. 41.</b> Wykres pomiarów pyłów PM <sub>2,5</sub> w dniach pomiarowych. Miejsce pomiarowe: Port Lotniczy Kraków-Balice .....	104
<b>Rys. 42.</b> Średnie dobowe wartości danych pomiarowych GIOŚ oraz własne dla analizowanego okresu od 1 sierpnia 2022 r. do 2 października 2022 r. ....	106
<b>Rys. 43.</b> Wykres pomiarów pyłów PM <sub>2,5</sub> w dniach pomiarowych. Miejsce pomiarowe: Kraków ul. Bulwarowa .....	107
<b>Rys. 44.</b> Stężenie niklu (Ni), arsenu (As) i kadmu (Cd) w poszczególnych tygodniach w okresie od 1 sierpnia 2022 r. do 2 października 2022 r. ....	110
<b>Rys. 45.</b> Stężenie ołowiu (Pb) w poszczególnych tygodniach w okresie od 1 sierpnia 2022 r. do 2 października 2022 r. ....	111
<b>Rys. 46.</b> Rozkład stężenia pyłu PM <sub>2,5</sub> w analizowanym okresie .....	117
<b>Rys. 47.</b> Rozkład temperatury w analizowanym okresie.....	117
<b>Rys. 48.</b> Rozkład zachmurzenia w analizowanym okresie.....	117
<b>Rys. 49.</b> Rozkład ciśnienia powietrza w analizowanym okresie.....	117
<b>Rys. 50.</b> Rozkład zachmurzenia w analizowanym okresie.....	117

<b>Rys. 51.</b> Rozkład wilgotności względnej w analizowanym okresie .....	117
<b>Rys. 52.</b> Model <i>HYSPLIT</i> dla trajektorii wstecznych w punkcie pomiarowym Kraków-Balice w 2021 roku dla: a) 24.03, b) 25.03, c) 26.03, d) 27.03, e) 28.03 .....	126
<b>Rys. 53.</b> Mapy synoptyczne dla godz. 12:00 UTC: a) 24 marca 2021; b) 25 marca 2021; c) 26 marca 2021; d) 27 marca 2021; e) 28 marca 2021 .....	131
<b>Rys. 54.</b> Model <i>HYSPLIT</i> dla trajektorii wstecznych w punkcie pomiarowym Kraków, ul. Bulwarowa w 2022 roku dla: a) 15.08, b) 16.08, c) 17.08, d) 18.08, e) 19.08.....	135
<b>Rys. 55.</b> Mapy synoptyczne dla godz. 12:00 UTC: a) 15 sierpnia 2022; b) 16 sierpnia 2022; c) 17 sierpnia 2022; d) 18 sierpnia 2022; e) 19 sierpnia 2022.	138
<b>Rys. 56.</b> Wybrane parametry modelu <i>HYSPLIT</i> dla źródła ArcelorMittal .....	140
<b>Rys. 57.</b> Model <i>HYSPLIT</i> - koncentracja pyłów PM <sub>2,5</sub> wyemitowanych z Zakładu ArcelorMittal .....	141
<b>Rys. 58.</b> Model <i>HYSPLIT</i> - koncentracja pyłów PM <sub>2,5</sub> wyemitowanych z Zakładu ArcelorMittal w powiększeniu z zaznaczonym punktem pomiarowym .....	141
<b>Rys. 59.</b> Model <i>HYSPLIT</i> - depozycja pyłów PM <sub>2,5</sub> wyemitowanych z Zakładu ArcelorMittal .....	142
<b>Rys. 60.</b> Model <i>HYSPLIT</i> - depozycja pyłów PM <sub>2,5</sub> wyemitowanych z Zakładu ArcelorMittal w powiększeniu z zaznaczonym punktem pomiarowym .....	143
<b>Rys. 61.</b> Model <i>HYSPLIT</i> - trasa trajektorii mas powietrza z Zakładu ArcelorMittal w Krakowie.....	144
<b>Rys. 62.</b> Model <i>HYSPLIT</i> – przekrój cząstkowy trajektorii pyłów z Zakładu ArcelorMittal w Krakowie.....	145
<b>Rys. 63.</b> Wybrane parametry modelu <i>HYSPLIT</i> dla źródła Elektrociepłownia Kraków .....	146
<b>Rys. 64.</b> Model <i>HYSPLIT</i> - koncentracja pyłów PM <sub>2,5</sub> wyemitowanych z Elektrociepłowni Kraków .....	147
<b>Rys. 65.</b> Model <i>HYSPLIT</i> - koncentracja pyłów PM <sub>2,5</sub> wyemitowanych z Elektrociepłowni Kraków w powiększeniu z zaznaczonym punktem pomiarowym .....	147
<b>Rys. 66.</b> Model <i>HYSPLIT</i> - depozycja pyłów PM <sub>2,5</sub> wyemitowanych z Elektrociepłowni Kraków .....	148
<b>Rys. 67.</b> Model <i>HYSPLIT</i> - depozycja pyłów PM <sub>2,5</sub> wyemitowanych z Elektrociepłowni Kraków w powiększeniu z zaznaczonym punktem pomiarowym .....	148

<b>Rys. 68.</b> Model <i>HYSPLIT</i> - trasa trajektorii mas powietrza z Elektrociepłowni Kraków .....	149
<b>Rys. 69.</b> Model <i>HYSPLIT</i> – przekrój cząstkowy trajektorii pyłów z Elektrociepłowni Kraków .....	150
<b>Rys. 70.</b> Wybrane parametry modelu <i>HYSPLIT</i> dla źródła Ekospalarnia Kraków .....	151
<b>Rys. 71.</b> Model <i>HYSPLIT</i> - koncentracja pyłów PM <sub>2,5</sub> wyemitowanych z Ekospalarni Kraków.....	152
<b>Rys. 72.</b> Model <i>HYSPLIT</i> - koncentracja pyłów PM <sub>2,5</sub> wyemitowanych z Ekospalarni Kraków w powiększeniu z zaznaczonym punktem pomiarowym....	152
<b>Rys. 73.</b> Model <i>HYSPLIT</i> - depozycja pyłów PM <sub>2,5</sub> wyemitowanych z Ekospalarni Kraków .....	153
<b>Rys. 74.</b> Model <i>HYSPLIT</i> - depozycja pyłów PM <sub>2,5</sub> wyemitowanych z Ekospalarni Kraków w powiększeniu z zaznaczonym punktem pomiarowym .....	153
<b>Rys. 75.</b> Model <i>HYSPLIT</i> - trasa trajektorii mas powietrza z Ekospalarni Kraków .....	154
<b>Rys. 76.</b> Model <i>HYSPLIT</i> – przekrój cząstkowy trajektorii pyłów z Ekospalarni Kraków .....	155
<b>Rys. 77.</b> Potrzeba i znaczenie edukacji ekologicznej.....	157

## Bibliografia

1. Aleksander T.: *Globalne i europejskie problemy współczesnej edukacji dorosłych*, Edukacja ustawiczna dorosłych, nr 1, 2015, s. 9-18.
2. Anfossi D., Physick W.: *Lagrangian Particle Models*, [w:] Zannetti P. (red.), *Air Quality Modeling – Theories, Methodologies, Computational Techniques, and Available Databases and Software*, vol. II – Advanced Topics, The EnviroComp Institute and Air & Waste Management Association, 2005, s. 93-162.
3. Anigacz W., Zakowicz E.: *Ochrona środowiska, Podręcznik dla studentów kierunków technicznych*, Politechnika Opolska Wydział Budownictwa, Opole 2003, ss. 386.
4. Awdankiewicz M.: *Największe erupcje wulkaniczne na Ziemi*, Kosmos, Problemy Nauk Biologicznych, tom 60, nr 3-4, Polskie Towarzystwo Przyrodników im. Kopernika, 2011, s. 227-234.
5. Barchańska H., Danek M., Dudziak M., Fross K., Kłusek M., Kudlek E., Mainka A., Pawełczyk S., Pawlyta J., Piotrowska N., Płonka J., Słomka-Słupik B., Szojda L., Tomiczek K., Zajusz-Zubek E.: *Zmiany klimatu i środowiska oraz redukcja zanieczyszczenia powietrza*, [w:] Werle S., Ferdyn-Grygierek J., Szczygieł M. (red.), *Monografia Ochrona klimatu i środowiska, nowoczesna energetyka*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2021, ss. 363.
6. Bekierski D., Kostyrko K. B.: *The Influence of Outdoor Particulate Matter PM2.5 on Indoor Air Quality: The Implementation of a New Assessment Method*, *Energies*, vol. 14, nr 6230, 2021 s. 1-30.
7. Bell J.N.B., Treshow M.: *Zanieczyszczenie powietrza a życie roślin*, Wyd. Naukowo-Techniczne, Warszawa 2004, ss. 526.
8. Błaszczak B., Ziola N., Mathews B., Klejnowski K., Słaby K.: *The Role of PM2.5 Chemical Composition and Meteorology during High Pollution Periods at a Suburban Background Station in Southern Poland*, *Aerosol and Atmospheric Chemistry*, vol. 20, nr 11, 2020, s. 2433-2447.
9. Bogacki M., Syguła P.: *Emisje biogeniczne lotnych związków organicznych do powietrza, Wskaźniki emisji, metody modelowania*, Wydawnictwa AGH, Kraków 2014, ss. 132.

10. Bokwa A.: *Zanieczyszczenie powietrza*, [w:] Matuszko D. (red.), *Klimat Krakowa w XX wieku*, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków 2007, s. 187-199.
11. Boon R.G.J., Alexaki A., Herrera Becerra E.: *The Ilo Clean Air Project: a local response to industrial pollution control in Peru*, *Environment & Urbanization*, vol. 13, nr 2, 2001, s. 215-232.
12. Bukowski K., Woźniak K.: *Polimorfizm genów kodujących białka naprawy DNA a zawodowe i środowiskowe narażenie na ołów, arsen i pestycydy*, *Medycyna Pracy*, t. 69, nr 2, 2018, s. 225-235.
13. Burkart J., Steiner G., Reischl G., Moshhammer H., Neuberger M., Hitzemberger R.: *Characterizing the performance of two optical particle counters (Grimm OPC1.108 and OPC1.109) under urban aerosol conditions*, *Journal of Aerosol Science*, vol. 41, nr 10, 2010, s. 953-962.
14. Burns P.C., Finch R. (red.): *Uranium: Mineralogy, Geochemistry, and the Environment*, *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, vol. 38, 1999, ss. 679.
15. Butcher T.A., Pierce B.: *Accomplishments of the American-Polish Program for Elimination of Low Emissions in Kraków*, preprint of a paper presented at the MPEC Conference on Heat Engineering in the Next Century, Brookhaven National Laboratory, Cracow 1998, s. 1-16.
16. Byun D. W., Lacser A., Yamartino R., Zannetti P.: *Eulerian Dispersion Models*, [w:] Zannetti P. (red.), *Air Quality Modeling – Theories, Methodologies, Computational Techniques, and Available Databases and Software*, vol. I – Fundamentals, The EnviroComp Institute and Air & Waste Management Association, 2003, s. 213-291.
17. Ciapa S., Śliwka M.: *Zielono-niebieska infrastruktura w środowisku miejskim na przykładzie Krakowa*, *Polish Journal for Sustainable Development*, t. 26, nr 2, 2022, s. 7-14.
18. Ciepiera M., Sobczyk W.: *Zanieczyszczenie powietrza ze źródeł antropogenicznych*, *Ekonatura* ogólnopolski miesięcznik ekologiczny, nr 4 art. 173, 2018a, s. 24-26.

19. Ciepiela M., Sobczyk W.: *Przykłady rozwiązań technologicznych i urbanistycznych ograniczających powstawanie smogu kwaśnego*, Edukacja – Technika – Informatyka: kwartalnik naukowy, nr 1, 2018b, s. 60-65.
20. Ciepiela M., Sobczyk W.: *A Study of PM 10, PM 2.5 Concentrations in the Atmospheric Air in Kraków, Poland*, Inżynieria Mineralna, vol. 1, nr 1, 2021b, s. 129-135.
21. Ciepiela M., Sobczyk W.: *Dust Pollution Impact on the Environment and Human*, [w:] VinSmartEco. Zbiór materiałów II międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji, 20–21 maja 2021, vol. 2, nr 31, 2021c, s. 140.
22. Ciepiela M., Sobczyk W.: *Transboundary Air Pollution in the Krakow Agglomeration Using the HYSPLIT Model*, Inżynieria Mineralna, vol. 1, nr 51, 2023, s. 161-167.
23. Chuchro M., Sarlej W., Grzegorzczak M., Nurzyńska K.: *Application of Photo Texture Analysis and Weather Data in Assessment of Air Quality in Terms of Airborne PM10 and PM2.5 Particulate Matter*, Sensors, vol. 21, nr 5483, 2021, s. 1-20.
24. Council of the European Union 6771/11 18 February 2011, Brussels 2011.
25. Cowie J.: *Zmiany klimatyczne. Przyczyny, przebieg i skutki dla człowieka*, Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa 2009, ss. 451.
26. Cygański A.: *Metody spektroskopowe w chemii analitycznej*, Wyd. Naukowe PWN, Warszawa 2017, ss. 504.
27. Czaplicka Z., Czaplicka A.: *Rola światła w funkcjonowaniu miasta*, [w:] Tabaka P. (red.), *Światło nocą: między zagrożeniem a rozwojem*, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, 2022, s. 315-330.
28. Czeczot H., Majewska-Wierzbicka M.: *Kadm - zagrożenie i skutki zdrowotne*, Farmacja Polska, t. 66, nr 4, 2010, s. 243-250.
29. Czerwińska J., Wielgosiński G.: *The effect of selected meteorological factors on the process of Polish smog formation*, Journal of Ecological Engineering, vol. 21, nr 1, 2020, s. 180-187.

30. Decyzja wykonawcza Komisji z dnia 12 grudnia 2011 r. ustanawiająca zasady stosowania dyrektyw 2004/107/WE i 2008/50/WE Parlamentu Europejskiego i Rady w odniesieniu do systemu wzajemnej wymiany informacji oraz sprawozdań dotyczących jakości otaczającego powietrza (notyfikowana jako dokument nr C (2011) 9068).
31. Dobrzańska B., Dobrzański G., Kielczewski D.: *Ochrona środowiska przyrodniczego*, Wyd. Naukowe PWN, Warszawa 2012. s. 460.
32. Dröge J., Klingelhöfer D., Braun M., Groneberg D. A.: *Influence of a large commercial airport on the ultrafine particle number concentration in a distant residential area under different wind conditions and the impact of the COVID-19 pandemic*, *Environmental Pollution*, vol. 345, 2024, s. 1-10.
33. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2001/81/WE z dnia 23 października 2001 r. w sprawie krajowych poziomów emisji dla niektórych rodzajów zanieczyszczenia powietrza.
34. Dyrektywa 2004/107/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 15 grudnia 2004 r. w sprawie arsenu, kadmu, rtęci, niklu i wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych w otaczającym powietrzu.
35. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/50/WE z dnia 21 maja 2008 r. w sprawie jakości powietrza i czystszej powietrza dla Europy.
36. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/75/UE z dnia 24 listopada 2010 r. w sprawie emisji przemysłowych i emisji pochodzących z chowu zwierząt gospodarskich (zintegrowane zapobieganie zanieczyszczeniom i ich kontrola).
37. Eck T. F., Holben B., Kim J., Beyersdorf A., Choi M., Lee S., Koo J.-H., Giles M., Schafer J., Sinyuk A., Peterson D. A., Reid J. S., Arola A., Slutsker I., Smirnov A., Sorokin M., Kraft J., Crawford J., Anderson B. E., Thornhill K. L., Diskin G. S., Kim S., Park S.: *Influence of cloud, fog, and high relative humidity during pollution transport events in South Korea: Aerosol properties and PM<sub>2.5</sub> variability*, *Atmospheric Environment*, vol. 232, 2020, s. 1-16.
38. Eurydice: *Edukacja i szkolenia dorosłych w Europie*, Warszawa 2015, ss. 164.

39. Frączkowski T.: *Monitoring pyłu zawieszonego w atmosferze. Cz. 1, Metody pomiaru stężenia pyłu zawieszonego*, LAB Laboratoria, Aparatura, Badania, R. 22, nr 2, 2017, s. 32-36.
40. Gawor L.: *Oblicza polskiej sozologii: Walery Goetel i Julian Aleksandrowicz*, *Wschodni Rocznik Humanistyczny*, t. XI, 2015, s. 203–215.
41. Gębicki J., Szymańska K., Wardencki W.: *Równoważność metod pomiarowych ciągłych i odniesienia stosowanych do oznaczania PM10*, Wyd. Agencja Regionalnego Monitoringu Atmosfery Aglomeracji Gdańskiej (ARMAAG), Gdańsk 2012, s. 91-92.
42. Gładysz B., Mercik J.: *Modelowanie ekonometryczne. Studium przypadku*, wyd. II, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2007, ss. 126.
43. Główny Inspektorat Ochrony Środowiska: *Wykonawczy program Państwowego Monitoringu Środowiska na rok 2021. Monitoring jakości powietrza*, Warszawa 2020, ss. 28.
44. Godłowska J.: *Wpływ warunków meteorologicznych na jakość powietrza w Krakowie. Badania porównawcze i próba podejścia modelowego*, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa 2019, ss. 102.
45. Grobelak A., Kacprzak M., Fijałkowski K.: *Fitoremediacja – niedoceniony potencjał roślin w oczyszczaniu środowiska*, *JEcolHealth*, vol. 14, nr 6, 2010, s. 276-280.
46. GUS Główny Urząd Statystyczny: *Rozwój regionalny Polski – raport analityczny 2022*, Warszawa, ss. 230.
47. Habuda A.: *Systemowość prawa ochrony środowiska. Fakt czy postulat?*, [w:] Korzeniowski P. (red.), *Zagadnienia systemowe ochrony środowiska*, Wyd. Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź 2015., ss. 246.
48. Hys A., Dumańska J., Tworek K.: *Stężenie pyłów zawieszonych PM10 w Polsce w 2015 roku – porównanie danych z serwisu CAMS programu Copernicus z danymi Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska*, *Metrologia i Probiernictwo – Biuletyn Głównego Urzędu Miar*, t. 1, nr (20), 2018, s. 12-19.

49. Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla: *Wytyczne do pozwoleń emisyjnych, Uwzględnianie w pozwoleniach na emisję gazów lub pyłów do powietrza i pozwoleniach zintegrowanych procedury wdrażania działań ograniczających emisję pyłu do powietrza z instalacji w przypadku wprowadzenia 3. stopnia zagrożenia zanieczyszczeniem powietrza*, Projekt LIFE, Zabrze 2022.
50. Instytut Podstaw Inżynierii Środowiska Polskiej Akademii Nauk: *Procedura wagowa. Określenie masy filtrów przed i po ekspozycji z wykorzystaniem robotycznego systemu pomiarowego RB 2.4Y.F produkcji Radwag Wagi Elektroniczne*, numer referencyjny: C2-001/2020/NP-I, 2021 Zabrze, ss. 16.
51. Janka R.: *Zanieczyszczenia pyłowe i gazowe. Podstawy obliczania i sterowania poziomem emisji*. Wyd. Naukowe PWN, Warszawa 2014, ss. 378.
52. Jarzyna K.: *Metody określania warunków dyspersji zanieczyszczeń powietrza oraz przykłady ich zastosowania*, Problemy Ekologii Krajobrazu, tom XVI, Warszawa 2006, s. 321-330.
53. Juda J., Chróściel S.: *Ochrona powietrza atmosferycznego*, Wyd. Naukowo-Techniczne, Warszawa 1974., ss. 446.
54. Juda-Rezler K., Toczko B. (red.): *Pyły drobne w atmosferze, Kompendium wiedzy o zanieczyszczeniu powietrza pyłem zawieszonym w Polsce, Praca zespołowa pod redakcją Judy-Rezler K. i Toczko B.*, Inspekcja Ochrony Środowiska, Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa 2016, ss. 279.
55. Kaczmarczyk M. (red.): *Niska emisja. Efektywność energetyczna w gminach i samorządach. Monografia*, Wyd. Globenergia, Kraków 2017, ss. 133.
56. Karaczun Z., Obidowska G., Indeka L.: *Ochrona środowiska – współczesne problemy*, Wyd. SGGW, Warszawa 2016, ss. 323.
57. Karski L.: *Wybrane problemy dostosowania polskiego prawa ochrony środowiska do prawa wspólnotowego*, Prawo i Środowisko, t. 1, nr 57, 2009, s. 23-32.
58. Kleczkowski P.: *Smog w Polsce. Przyczyny, skutki, przeciwdziałanie*, Wyd. Naukowe PWN, Warszawa 2020, ss. 382.
59. Konieczka P., Namieśnik J. (red.): *Ocena i kontrola jakości wyników pomiarowych analitycznych*, Wyd. WNT, Warszawa 2017, ss. 344.

60. Korzeniowska-Rejmer E., Generowicz A.: *Wpływ warunków mikroklimatycznych i terenowych na rozprzestrzenianie zanieczyszczeń ze składowisk odpadów komunalnych w powietrzu atmosferycznym*, Czasopismo Techniczne. Środowisko, t. R. 109, z. 1-Ś, 2012, s. 113-127.
61. Kosiński K.: *Związek między czynnikami mikroklimatycznymi a zanieczyszczeniem powietrza atmosferycznego*, Roczniki PZH, t. XII, nr 3, 1961, s. 234-248.
62. Kotowski T., Motyka J., Knap W., Bielewski J.: *17-Year study on the chemical composition of rain, snow and sleet in very dusty air (Krakow, Poland)*, Journal of Hydrology, vol. 582, nr 124543, 2020, s. 1-13.
63. Kozak M.: *Zastosowanie reaktora mikrofalowego do mineralizacji próbek z matrycą węglowodorową*, Nafta-Gaz, Instytut Nafty i Gazu, nr 1, 2012, s. 859-867.
64. Krochmal D.: *Metody pomiarów zanieczyszczeń powietrza atmosferycznego*, Międzynarodowe Studium Podyplomowe Ochrona Środowiska w Obszarach Zurbanizowanych, Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, 1994, s. 1-32.
65. Krystek J. (red.): *Ochrona środowiska dla inżynierów*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2018, ss. 400.
66. Krzeszowiak J., Pawlas K.: *Particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), properties and epidemiological significance for respiratory and cardiovascular diseases. A review of the literature on the effects of short- and long-term exposure*, Environmental Medicine, vol. 21, nr 2, 2018, s. 7-13.
67. Kuchcik M., Milewski P.: *Zanieczyszczenie powietrza w Polsce – stan, przyczyny i skutki*, Studia Komitetu Przestrzennego Zagospodarowania Kraju PAN, t. 182, nr 2, 2018, s. 341-364.
68. Kunecki P., Franus W., Wdowin M.: *Statistical study and physicochemical characterization of particulate matter in the context of Kraków, Poland*, Atmospheric Pollution Research, vol. 11, nr 3, 2020, s. 520-530.

- 69.Kuskowska K., Dmochowski D.: *Analiza rozkładu stężeń pyłu zawieszonego frakcji PM10, PM2,5 i PM1,0 na różnych wysokościach Mostu Gdańskiego*, Zeszyty Naukowe SGSP, t. 3, nr 59, 2016, s.101-119.
- 70.Labudda M.: *Hepatotoksyczność ołowiu – wybrane aspekty patobiochemii*, Medycyna Pracy, t. 64, nr 4, 2013, s. 565.
- 71.Leikauf G. D., Kim S.-H., Jang A.-S.: *Mechanisms of ultrafine particle-induced respiratory health effects*, Experimental & Molecular Medicine, vol. 52, 2020, s. 329–337.
- 72.Leśniak A.: *Monitoring, bioindykacja – definicje i desygnaty*, Polskie Towarzystwo Leśne, nr 5, 1995, s. 1-12.
- 73.Lewandowski W.M., Aranowski R.: *Technologie ochrony środowiska w przemyśle i energetyce*, Wyd. Naukowe PWN, Warszawa 2016, ss. 485.
- 74.Lewandowski W.M., Klugmann-Radziemska E.: *Proekologiczne odnawialne źródła energii*, Wyd. Naukowe PWN, Warszawa 2017, ss. 488.
- 75.Li Q.-F., Wang-Li L., Liu Z., Heber A. J.: *Field evaluation of particulate matter measurements using tapered element oscillating microbalance in a layer house*, Journal of the Air & Waste Management Association, vol. 62, nr 3, 2012, s. 322-335.
- 76.Lisiak-Zielińska M., Borowiak K., Budka A., Kanclerz J., Janicka E., Kaczor A., Żyromski A., Biniak-Pieróg M., Podawca K., Mleczek M., Niedzielski P.: *How polluted are cities in Central Europe? – Heavy metal contamination in Taraxacum officinale and soils collected from different land use areas of three representative cities*, Chemosphere, vol. 266, 2021, s. 1-15.
- 77.Liu Y., Zhou Y., Lu J.: *Exploring the relationship between air pollution and meteorological conditions in China under environmental governance*, Scientific Reports, vol. 10, nr 1, art. 14518, 2020. s. 1-11.
- 78.Malec A., Borowski G.: *Zagrożenia pyłowe oraz monitoring powietrza atmosferycznego*, Inżynieria Ekologiczna, nr 50, Polskie Towarzystwo Inżynierii Ekologicznej, 2016, s. 160-170.
- 79.Małecki Z. (red.), Deńko S., Faber J., Kromka K., Kuzianik R., Kwaśnik A., Leśniak M., Narębska-Miler G., Nedoma J., Noworól A., Pędracki Cz., Pocięcha

- A., Reczek A., Sepioł J., Techmański R.: *Problemy sozologiczne aglomeracji miejsko-przemysłowych, Przeobrażenia gospodarcze w Krakowie*, Komitet Inżynierii Środowiska Polskiej Akademii Nauk, Wyd. Mentor, Kraków 1998, ss. 136.
- 80.Mannion A. M.: *Zmiany środowiska Ziemi. Historia środowiska przyrodniczego i kulturowego*, Wyd. PWN, Warszawa 2001, ss. 450.
- 81.Markowicz K.: *Procesy radiacyjne w atmosferze*, Materiały do wykładu, Instytut Geofizyki, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski, Warszawa 2013, ss. 186.
- 82.Matuszko D., Piotrowicz K.: *Cechy klimatu miasta a klimat Krakowa*, [w:] Trzepacz P., Więclaw-Michniewska J., Brzosko-Sermak A., Kołoś A. (red.), *Miasto w badaniach geografów*, t. 1, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego, 2015, s. 221-241.
- 83.Mazur M.: *Systemy ochrony powietrza*, Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne AGH im. S. Staszica, Kraków 2004, ss. 247.
- 84.Mazur M., Oleniacz R., Bogacki M., Szczygłowski P.: *Ocena wpływu ArcelorMittal Poland S.A. Oddział w Krakowie na jakość powietrza*, [w:] Koniecznyński J. (red.), *Ochrona powietrza w teorii i praktyce*, Wyd. IPIŚ PAN, t. 1, 2008, s. 123-130.
- 85.Mazurek H., Badyda A. (red.): *Smog. Konsekwencje zdrowotne zanieczyszczeń powietrza*, PZWL Wyd. Lekarskie, Warszawa 2018, ss. 212.
- 86.Merzenich H.: *Air pollution and airport apron workers: A neglected occupational setting in epidemiological research*, *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, vol. 231, 2021, s. 1-4.
- 87.Ministerstwo Środowiska, Główny Inspektorat Ochrony Środowiska: *Wskazówki metodyczne do modelowania matematycznego w systemie zarządzania jakością powietrza*, Warszawa 2003, ss. 59.
- 88.Mleczek P., Borowiak K., Budka A., Szostek M., Niedzielski P.: *Possible sources of rare earth elements near different classes of road in Poland and their phytoextraction to herbaceous plant species*, *Environmental Research*, vol. 193, 2021, s. 1-14.

- 89.Molaie S., Lino P.: *Review of the Newly Developed, Mobile Optical Sensors for Real-Time Measurement of the Atmospheric Particulate Matter Concentration*, *Micromachines*, t. 12, nr 416, 2021, s. 1-22.
- 90.Myga-Piątek U.: *Krajobrazy kulturowe. Aspekty ewolucyjne i typologiczne*, Uniwersytet Śląski, Katowice 2012 ss. 376.
- 91.Mysłowski J.: *Zanieczyszczenie powietrza przez pojazdy samochodowe*, Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa 2011, ss. 156.
- 92.Najwyższa Izba Kontroli: *Informacja o wynikach kontroli - Ochrona powietrza przed zanieczyszczeniami*, nr ewid. 150/2018/P/17/078/LKR, Warszawa 2018, ss. 280.
- 93.Niesler M., Stecko J., Stelmach S., Kwiecińska-Mydlak A.: *Biochars in Iron Ores Sintering Process: Effect on Sinter Quality and Emission*, *Energies*, vol. 14, nr 13, 2021, s. 1-20.
- 94.Norma PN-EN 14902:2010. *Jakość powietrza atmosferycznego. Standardowa metoda oznaczania Pb, Cd, As i Ni we frakcji PM10 pyłu zawieszonego*, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2010.
- 95.Oleniacz R., Rzeszutek M.: *Obliczenia rozprzestrzeniania się pyłu drobnego w powietrzu atmosferycznym z wykorzystaniem dyfuzyjnych modeli Gaussa*, [w:] *Nauka i wiedza kluczem do poznania świata*, rozdz. 5, Mateusz Weiland Network Solutions, 2015, s. 42-51.
- 96.Oruba R.: *Rola kominów przemysłowych w inżynierii środowiska*, *Materiały Budowlane*, nr 5, 2014, s. 26-27.
- 97.Pałasz J.W.: *Niska emisja ze spalania węgla i metody jej ograniczenia*, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwie 2016, ss. 243.
- 98.Parlińska M., Pomichowski P.: *Analiza czynników wpływających na jakość powietrza w wybranych regionach Polski*, *Problemy Drobnych Gospodarstw Rolnych*, nr 2, 2018, s. 83-91.
- 99.Parysek J. J.: *Aglomeracje miejskie w Polsce oraz problemy ich funkcjonowania i rozwoju*, [w:] *Wybrane problemy rozwoju i rewitalizacji miast: aspekty poznawcze i praktyczne*, Wyd. Naukowe, IGSEiGP UAM, Rozwój Regionalny i Polityka Regionalna, nr 5, Poznań 2008, ss. 170.

100. Patashnick H., Rupprecht E. G.: *Continuous PM-10 Measurements Using the Tapered Element Oscillating Microbalance*, Journal of the Air & Waste Management Association, 1991, s. 1079-1083.
101. Polski Klub Ekologiczny Fundacja Międzynarodowy Instytut Polityki i Strategii Ekologicznej: *Problemy Ekologiczne Miasta Krakowa*, Oficyna Wydawnicza Text, Kraków 2018, ss. 160.
102. Połec B., Tępiński J. (red. nauk.): *Metody i narzędzia wspomagające proces oceny ryzyka awarii w zakładach przemysłowych*, Wyd. CNBOP-PIB, Józefów 2019, ss. 167.
103. Pomorska K., Duda A.: *Możliwości zastosowania symulacji komputerowych w prognozowaniu rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń*, Postępy Nauki i Techniki, nr 1, 2017, s. 145-151.
104. Pozwolenie zintegrowane 2020: Marszałek Województwa Małopolskiego, decyzja z dnia 15 lipca 2020 r., znak sprawy: SR-II.7222.1.31.2018, dotycząca zmiany pozwolenia zintegrowanego dla instalacji PGE Energia Ciepła SA Oddział nr 1 w Krakowie, Kraków 2020.
105. Pozwolenie zintegrowane 2021: Marszałek Województwa Małopolskiego, decyzja z dnia 27 września 2021 r., znak sprawy: SR.II.7222.2.17.2021.BK, dotycząca zmiany pozwolenia zintegrowanego dla Instalacji Termicznego Przekształcania Odpadów w Krakowie, Kraków 2021.
106. Pozwolenie zintegrowane 2022: Marszałek Województwa Małopolskiego, decyzja z dnia 4 sierpnia 2022 r., znak sprawy: SR-II.7222.2.10.2020.BK, dotycząca zmiany pozwolenia zintegrowanego dla instalacji ArcelorMittal Poland SA Oddział w Krakowie, Kraków 2022.
107. Prandecki K., Sadowski M.: *Międzynarodowa ewolucja ochrony środowiska*, LAM – Wydawnictwo Akademii Finansów, Warszawa 2010, ss. 173.
108. Raport zrównoważonego rozwoju 2020: Kraków Airport, Kraków 2020.
109. Raport zrównoważonego rozwoju 2022: ArcelorMittal Poland, 2022.
110. Rataj M., Holewa-Rataj J.: *Analiza zmian jakości powietrza Małopolski w latach 2012–2020*, Nafta-Gaz, tom R. 76, nr 11, Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy, 2020., s. 854-863.

111. Reymer P.: *Podstawy ekotoksykologii*, Wyd. Ekoinżynieria, Warszawa 1997, ss. 208.
112. Rogulski M., Badyda A.: *Air Pollution Observations in Selected Locations in Poland during the Lockdown Related to COVID-19*, Atmosphere, 2021, s. 1-22.
113. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 26 stycznia 2010a r. w sprawie wartości odniesienia dla niektórych substancji w powietrzu (Dz.U. 2010 nr 16 poz. 87).
114. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 2 lipca 2010b r. w sprawie przypadków, w których wprowadzanie gazów lub pyłów do powietrza z instalacji nie wymaga pozwolenia (Dz.U. 2010 nr 130 poz. 881).
115. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 2 lipca 2010c r. w sprawie rodzajów instalacji, których eksploatacja wymaga zgłoszenia (Dz.U. 2010 nr 130 poz. 880).
116. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 24 sierpnia 2012 r. w sprawie poziomów niektórych substancji w powietrzu (Dz.U. 2012 poz. 1031).
117. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 14 czerwca 2019 r. w sprawie programów ochrony powietrza oraz planów działań krótkoterminowych (Dz.U. 2019 poz. 1159).
118. Rozporządzenie Ministra Klimatu z dnia 24 września 2020a r. w sprawie standardów emisyjnych dla niektórych rodzajów instalacji, źródeł spalania paliw oraz urządzeń spalania lub współspalania odpadów (Dz.U. 2020 poz. 1860).
119. Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 11 grudnia 2020b r. w sprawie dokonywania oceny poziomów substancji w powietrzu (Dz.U. 2020 poz. 2279).
120. Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 7 września 2021 r. w sprawie wymagań w zakresie prowadzenia pomiarów wielkości emisji (Dz.U. 2021 poz. 1710).
121. Rup K.: *Procesy przenoszenia zanieczyszczeń w środowisku naturalnym*, Wyd. WNT, Warszawa 2017, ss. 352.

122. Rus P.: *Współczesne zagrożenia bezpieczeństwa w aglomeracjach – przykład krakowski*, Global Studies Review, vol. 1, nr 3, 2020, s. 106-118.
123. Ryś A., Samek L., Stęgowski Z., Styszko K.: Comparison of concentrations of chemical species and emission sources PM<sub>2.5</sub> before pandemic and during pandemic in Krakow, Poland Scientific Reports, 2022, vol. 12, nr 16481, 2022, s. 1-12.
124. Rzeszutek M., Oleniacz R.: *Zastosowanie systemu modeli CALMET/CALPUFF o wysokiej rozdzielczości do oceny wpływu na jakość powietrza spalarni odpadów komunalnych w Krakowie*, Inżynieria i Ochrona Środowiska, t. 18, nr 1, 2015, s. 5-22.
125. Saleem, A., Awan, T., & Akhtar, M. F.: *A comprehensive review on endocrine toxicity of gaseous components and particulate matter in smog*. Frontiers in Endocrinology, vol. 15, 2024, s. 1-16.
126. Samek L., Stęgowski Z., Styszko K., Furman L., Zimnoch M., Skiba A., Kistler M., Kasper-Giebl A., Róžański K., Konduracka E.: *Seasonal variations of chemical composition of PM<sub>2.5</sub> fraction in the urban area of Krakow, Poland: PMF source attribution*, Air Quality Atmosphere and Health, vol. 13, nr 1, 2020, s. 89-96.
127. Samek L., Turek-Fijak A., Skiba A., Furman P., Styszko K., Furman L., Stęgowski Z.: *Complex Characterization of Fine Fraction and Source Contribution to PM<sub>2.5</sub> Mass at an Urban Area in Central Europe*, Atmosphere, vol. 11, nr 1085, 2020, s. 1-13.
128. Schumacher I.: *Funkcje ekologiczne parków miejskich*, Prace i Studia Geograficzne, t. 36, Warszawa 2005, s. 107-120.
129. Selley L., Lammers A., Le Guennec A., Pirhadi M., Sioutas C., Janssen N., Maitland-van der Zee A. H., Mudway I., Cassee F.: *Alterations to the urinary metabolome following semi-controlled short exposures to ultrafine particles at a major airport*, International Journal of Hygiene and Environmental Health, vol. 237, 2021, s. 1-12.
130. Shukla K., Aggarwal S.G.: *A Technical Overview on Beta-Attenuation Method for the Monitoring of Particulate Matter in Ambient Air*, Aerosol and Air Quality Research, vol. 22, nr 12, 2022 s. 1-21.

131. Siwa D.: *Ochrona powietrza w świetle projektu ustawy Prawo ochrony środowiska*, Problemy Ocen Środowiskowych, archiwalne zasoby Eko-Konsult, 2001, s. 1-14.
132. Skoczyńska A.: *Arsen w środowisku człowieka*, Medycyna Środowiskowa, vol. 21, nr 1, 2018, s. 1-19.
133. Sobczyk M.: *Statystyka, nowe wydanie*, Wyd. Naukowe PWN, Warszawa 2007, ss. 428.
134. Sobczyk W.: *Edukacja ekologiczna i prozdrowotna*, Wyd. Naukowe Akademii Pedagogicznej, Kraków 2000, ss. 170.
135. Sobczyk W. (red.): *Laboratorium z ochrony środowiska, Skrypty uczelniane*, Wydawnictwa AGH, Kraków 2010, ss. 181.
136. Sobczyk W. (red.): *Wybrane zagadnienia ochrony i inżynierii środowiska*. Wyd. AGH, Kraków 2014, ss. 321.
137. Sobczyk W., Ciepela M.: *A University as a Driving Force of Ecological Initiatives for Society*, Edukacja – Technika – Informatyka: kwartalnik naukowy, t. 32, nr 2, 2021, s. 197–202.
138. Stala-Szlugaj K.: *Emisja pyłów ze spalania węgla kamiennego z ciepłowni o mocy nominalnej mniejszej niż 50 MW w świetle obowiązujących standardów emisyjnych*, Rocznik Ochrona Środowiska, tom 15, 2013, s. 1689–1704.
139. Stala-Szlugaj K.: *Polish Energy Policy in the context of the global coal demand prospects*, Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal, t. 27, nr 2, 2024, s. 211–226.
140. Starek A.: *Polichlorowane bifenyle – toksykologia – ryzyko zdrowotne*, Zakład Biochemii Toksykologicznej, Roczniki PZH, t. 52, nr 3, 2001, s. 187-201.
141. Stein A. F., Draxler R. R., Rolph G. D., Stunder B. J. B., Cohen M. D., Ngan F.: *NOAA's HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System*, American Meteorological Society, 2015, s. 2059–2077.
142. Stelmach S., Matuszek K., Hrycko P., Blaut A., Drumlak P., Bródka M., Knigawka P.: *Porównanie wpływu na środowisko spalania węgla kamiennego i*

*tw. błękitnego węgla w kotle c.o. z wykorzystaniem analizy tradycyjnej oraz analizy LCA*, Rynek Instalacyjny, nr 5, 2018, s. 79–82.

143. Stepnowski P., Synak E., Szafranek B., Kaczyński Z.: *Monitoring i analityka zanieczyszczeń w środowisku*, Wyd. Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk 2010, ss. 283.
144. Suchocka M., Gawłowska A., Semeniuk P.: *Rola roślin na terenach miejskich i ich wpływ na środowisko w kontekście zagospodarowania ciągów pieszo-jezdnych*, Rocznik, nr 10, 2019, s. 299-302.
145. Surgiewicz J.: *Oznaczanie niklu i jego związków w środowisku pracy*, Medycyna Pracy, t. 72, nr 3, Łódź 2021, s. 267-281.
146. Ścieżor T., Czaplicka A.: *The impact of atmospheric aerosol particles on the brightness of the night sky*, Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, vol. 254, 2020, s. 1-15.
147. Tian X., Cui K., Sheu H.-L., Hsieh Y.-K., Yu F.: *Effects of Rain and Snow on the Air Quality Index, PM<sub>2.5</sub> Levels, and Dry Deposition Flux of PCDD/Fs*, Aerosol and Air Quality Research, vol. 21, nr 8, 2021, s. 1-26.
148. Tumidajski T., Foszcz D., Niedoba T., Siewior J.: *Modele stochastyczne zanieczyszczeń powietrza w aglomeracjach przemysłowych*, Rocznik Ochrona Środowiska, t. 11, 2009, s. 543-554.
149. Uchwała nr XVIII/243/16 Sejmiku Województwa Małopolskiego z dnia 15 stycznia 2016 roku w sprawie wprowadzenia na obszarze Gminy Miejskiej Kraków ograniczeń w zakresie eksploatacji instalacji, w których następuje spalanie paliw.
150. Uchwała nr XLVII/732/18 Sejmiku Województwa Małopolskiego z dnia 26 marca 2018 r. w sprawie zmiany Uchwały Nr XV/174/03 Sejmiku Województwa Małopolskiego z dnia 22 grudnia 2003 roku w sprawie uchwalenia Planu Zagospodarowania Przestrzennego Województwa Małopolskiego.
151. Uchwała nr XXV/373/20 Sejmiku Województwa Małopolskiego z dnia 28 września 2020 r. w sprawie Programu ochrony powietrza dla województwa małopolskiego.

152. Uchwała nr LXXV/1102/23 Sejmiku Województwa Małopolskiego z dnia 20 listopada 2023 r. w sprawie zmiany uchwały nr XXV/373/20 Sejmiku Województwa Małopolskiego z dnia 28 września 2020 r. w sprawie Programu ochrony powietrza dla województwa małopolskiego.
153. Urząd Statystyczny w Krakowie: *Krakowski Obszar Metropolitalny w latach 2011-2015*, Kraków 2016, ss. 169.
154. Ustawa z dnia 20 lipca 1991 r. o Inspekcji Ochrony Środowiska (Dz.U. 1991 nr 77 poz. 335).
155. Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska (Dz.U. 2001 nr 62 poz. 627).
156. Ustawa 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)
157. Ustawa z dnia 17 lipca 2009 r. o systemie zarządzania emisjami gazów cieplarnianych i innych substancji (Dz.U. 2009 nr 130 poz. 1070).
158. Wątroba J.: *Prosto o dopasowaniu prostych, czyli analiza regresji liniowej w praktyce*, StatSoft Polska Sp. z o.o., 2011, s. 31-44.
159. Weiner J.: *Życie i ewolucja biosfery*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2008, ss. 816.
160. Welc J.: *Regresja liniowa jako narzędzie szacowania fundamentalnych współczynników beta na przykładzie spółek giełdowych z sektora maszyn przemysłowych*, Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu, nr 65, Ekonometria, 25, Wrocław 2009, s. 213-223.
161. Wielgosiński G., Zarzycki R.: *Technologie i procesy ochrony powietrza*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2018, ss. 498.
162. Wierzbińska M.: *Modelowanie rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń emitowanych z emitorów punktowych*, Inżynieria Ekologiczna, vol. 18, nr 2, 2017, s. 199-209.

163. Wierzińska M., Szczepaniak R.: *Wpływ warunków mikroklimatycznych na imisję pyłu zawieszonego oraz kształt smug kominowych w sezonie grzewczym*, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, 2021, s. 26-37.
164. Wołoszyn E.: *Metrologia i klimatologia w zarysie*, Wyd. Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2009, ss. 356.
165. Wróbel P.: *Kraków Airport – studium przypadku. Przekształcenia architektoniczno-urbanistyczne*, *Builder*, t. 1, nr 270, 2020, s. 36-39.
166. [www.arl.noaa.gov/dispersion](http://www.arl.noaa.gov/dispersion), NOAA Air Resources Laboratory: *HYSPLIT Dispersion Model*, [https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT\\_disp.php](https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT_disp.php), dostęp: 19.08.2024.
167. [www.arl.noaa.gov/HYSPLIT](http://www.arl.noaa.gov/HYSPLIT), NOAA Air Resources Laboratory: *HYSPLIT – Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model*, <https://www.arl.noaa.gov/hysplit/>, dostęp: 10.07.2024.
168. [www.arl.noaa.gov/trajectory](http://www.arl.noaa.gov/trajectory), NOAA Air Resources Laboratory: *HYSPLIT Trajectory Model*, [https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT\\_traj.php](https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT_traj.php), dostęp: 05.05.2024.
169. [www.arl.noaa.gov/vertical](http://www.arl.noaa.gov/vertical), NOAA Air Resources Laboratory: *Vertical Motion Options*, [https://www.arl.noaa.gov/documents/workshop/NAQC2007/HTML\\_Docs/trajectory.html](https://www.arl.noaa.gov/documents/workshop/NAQC2007/HTML_Docs/trajectory.html), dostęp: 06.08.2024.
170. [www.earth.google.com](http://www.earth.google.com), Google Earth: *Earth Web*, <https://earth.google.com/web/>, dostęp: 24.08.2024.
171. [www.eea.europa.eu](http://www.eea.europa.eu), EEA European Environment Agency: *Europe's air quality status 2023*, <https://www.eea.europa.eu/publications/europes-air-quality-status-2023>, dostęp: 14.07.2024.
172. [www.epa.europa.eu](http://www.epa.europa.eu), EPA United States Environmental Protection Agency: *Particulate Matter (PM) Pollution*, <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics>, dostęp: 17.08.2024.
173. [www.home.agh.edu.pl/inzynieria\\_biomedyczna](http://www.home.agh.edu.pl/inzynieria_biomedyczna), Inżynieria biomedyczna, I rok: *Analiza danych pomiarowych. Analiza wariancji*. Instrukcja do laboratorium,

- [http://home.agh.edu.pl/~mmd/media/dydaktyka/adp/analiza\\_wariancji.pdf](http://home.agh.edu.pl/~mmd/media/dydaktyka/adp/analiza_wariancji.pdf),  
dostęp: 16.08.2024.
174. [www.ibm.pl/analiza\\_wariancji](http://www.ibm.pl/analiza_wariancji), IBM: *Analiza wariancji (ANOVA)*,  
<https://www.ibm.com/docs/pl/cognos-analytics/11.2.0?topic=tests-analysis-variance-anova>, dostęp: 15.07.2024.
175. [www.ibm.pl/skorygowany\\_R\\_kwadrat](http://www.ibm.pl/skorygowany_R_kwadrat), IBM: *Skorygowany R kwadrat*,  
<https://www.ibm.com/docs/pl/cognos-analytics/12.0.0?topic=terms-adjusted-r-squared>, dostęp: 15.07.2024.
176. [www.ibm.pl/wielokrotna\\_regresja](http://www.ibm.pl/wielokrotna_regresja), IBM: *Wielokrotna regresja liniowa*,  
<https://www.ibm.com/docs/pl/cognos-analytics/12.0.0?topic=tests-multiple-linear-regression>, dostęp: 15.07.2024.
177. [www.knmi.nl/about](http://www.knmi.nl/about), KNMI (The Royal Netherlands Meteorological Institute): *About KNMI*, <https://www.knmi.nl/over-het-knmi/about>, dostęp: 17.05.2024.
178. [www.knmi.nl/weerkaarten](http://www.knmi.nl/weerkaarten), KNMI (The Royal Netherlands Meteorological Institute): *Weerkaarten archief Europa*,  
<https://www.knmi.nl/nederland-nu/klimatologie/daggegevens/weerkaarten>,  
dostęp: 17.05.2024.
179. [www.krakowairport.pl](http://www.krakowairport.pl), Kraków Airport: *Statystyki*,  
<https://www.krakowairport.pl/pl/miesieczne>, dostęp: 15.06.2024.
180. [www.le.ac.uk](http://www.le.ac.uk), University of Leicester: *Lecture 2, Regression Analysis*,  
<https://www.le.ac.uk/users/dsgp1/COURSES/THIRDMET/MYLECTURES/2MULTIREG.pdf>, dostęp: 15.08.2024.
181. [www.mapa.targeo.pl](http://www.mapa.targeo.pl), Targeo: *Mapa Krakowa*, <https://mapa.targeo.pl/#rd-mapa>, dostęp: 13.04.2024.
182. [www.meteoblue.pl](http://www.meteoblue.pl), Meteoblue: *Meteoblue Weather Forecasts*,  
<https://www.meteoblue.com>, dostęp: 24.05.2024.
183. [www.mfiles.pl/miary\\_asymetrii](http://www.mfiles.pl/miary_asymetrii), Encyklopedia Zarządzania: *Miary asymetrii*,  
[https://mfiles.pl/pl/index.php/Miary\\_asymetrii](https://mfiles.pl/pl/index.php/Miary_asymetrii), dostęp: 16.08.2024.

184. [www.mfiles.pl/wspolczynnik\\_determinacji](http://www.mfiles.pl/wspolczynnik_determinacji), Encyklopedia Zarządzania: *Współczynnik determinacji*,  
[https://mfiles.pl/pl/index.php/Wspolczynnik\\_determinacji](https://mfiles.pl/pl/index.php/Wspolczynnik_determinacji), dostęp:  
16.08.2024.
185. [www.mfiles.pl/wspolczynnik\\_zmiennosci](http://www.mfiles.pl/wspolczynnik_zmiennosci), Encyklopedia Zarządzania: *Współczynnik zmienności*,  
[https://mfiles.pl/pl/index.php/Wspolczynnik\\_zmiennosci](https://mfiles.pl/pl/index.php/Wspolczynnik_zmiennosci), dostęp: 16.08.2024.
186. [www.ncei.noaa.gov](http://www.ncei.noaa.gov), NCEI (National Centers for Environmental Information): Global Data Assimilation System (GDAS),  
<https://www.ncei.noaa.gov/access/metadata/landing-page/bin/iso?id=gov.noaa.ncdc:C00379>, dostęp: 12.08.2024.
187. [www.powietrze.gios.gov.pl/bank\\_danych](http://www.powietrze.gios.gov.pl/bank_danych), Główny Inspektorat Ochrony Środowiska: *Bank danych pomiarowych*,  
<https://powietrze.gios.gov.pl/pjp/archives>, dostęp: 14.05.2024.
188. [www.powietrze.gios.gov.pl/pomiary](http://www.powietrze.gios.gov.pl/pomiary), Główny Inspektorat Ochrony Środowiska: *Pomiary pyłu zawieszonego w powietrzu. Jak się to mierzy?*,  
<https://powietrze.gios.gov.pl/pjp/content/show/1000919>, dostęp:  
15.05.2024.
189. [www.sigmaearth.com](http://www.sigmaearth.com), Greenfield E.: *Need and Importance of Environmental Education*, Sigma Earth, dostępne na:  
<https://sigmaearth.com/need-and-importance-of-environmental-education/>  
[dostęp: 11 września 2024].
190. Zhou J., Zhao X., Yin T.: *Research on the Impact of Atmospheric Self-Purification Capacity on Environmental Pollution: Based on the Threshold Effect of Environmental Regulation*, Applied Sciences, vol. 13, nr 4, art. 2495, 2023, s. 1-22.
191. Zhu L., Liu J., Cong L., Ma W., Ma W., Zhang Z.: *Spatiotemporal Characteristics of Particulate Matter and Dry Deposition Flux in the Cuihu Wetland of Beijing*, Public Library of Science One, vol. 11, nr 7, 2016, s. 9-10.

192. Ziernicka-Wojtaszek A., Zuśka Z., Kopcińska J.: *Assessment of the Effect of Meteorological Conditions on the Concentration of Suspended PM2.5 Particulate Matter in Central Europe*, Sustainability, t. 16, nr 11, art. 4797, 2024, s. 1-14.
193. Zimny H.: *Ekologia miasta*, Agencja Reklamowo-Wydawnicza Arkadiusz Grzegorzczak, Warszawa 2005, ss. 233.
194. Ziolo I., Ziolo Z.: *Relacje między działalnością antropogeniczną a środowiskiem przyrodniczym*, [w:] Wilczyńska-Michalik W. (red.), *Antropogeniczna transformacja środowiska przyrodniczego*, Kraków 2010, s. 41-54.
195. Ziopaja K.: *Problem wyznaczania niepewności pomiaru wartości przemieszczeń podczas próbnego obciążenia obiektu mostowego*, Politechnika Poznańska. Wyd. Politechniki Poznańskiej, nr 21, 2016, s. 257-277.
196. Zgłobicki W., Baran-Zgłobicka B.: *Air pollution in major Polish cities in the period 2005–2021: Intensity, effects and attempts to reduce it*, Environmental Research, vol. 240, art. 17497, 2024, s. 1-12.

Załącznik 1. Warunki wprowadzania zanieczyszczeń do powietrza i charakterystyka miejsc wprowadzania gazów lub pyłów do powietrza przez zakład ArcelorMittal

Nr emitora	Źródło emisji/operacja technologiczna	Współrzędne geograficzne		Charakterystyka emitora						
		Szer. geogr.	Dług. geogr.	Parametry emitora		Parametry gazów na wylocie z emitora			Czas pracy	
				h	d	V	V <sub>pión</sub>	T		
[m]	[m]	[Nm <sup>3</sup> /h]	[m/s]	[K]	[h/rok]					
<b>Walcarka Tandem 4-kłatkowy</b>										
353	Walcarka 4-kłatkowa	N 50°5'4,45"	E 20°4'35,78"	25	3	350 000	14,8	293	8760*	
<b>Piece kołpakowe</b>										
345	Piece kołpakowe francuskie E1/4	N 50°5'5,74"	E 20°4'34,94"	30	1	22 000	0,0	339	8760*	
346	Piece kołpakowe francuskie E2/4	N 50°5'6,56"	E 20°4'35,93"	30	1	22 000	0,0	339	8760*	
347	Piece kołpakowe francuskie E3/4	N 50°5'8,04"	E 20°4'38,92"	30	1	22 000	0,0	339	8760*	
348	Piece kołpakowe francuskie E4/4	N 50°5'8,54"	E 20°4'40,17"	30	1	22 000	0,0	339	8760*	
349	Piece kołpakowe japońskie E5/6	N 50°5'7,68"	E 20°4'34,40"	30	1,7	70 100	11,9	379	8760*	
350	Piece kołpakowe japońskie E6/6	N 50°5'9,66"	E 20°4'38,89"	30	1,7	70 100	11,9	379	8760*	
<b>Wyglądzarka 1-kłatkowa</b>										
354	Wyglądzarka 1-kłatkowa B2	N 50°5'9,99"	E 20°4'47,43"	25	3	80 000	3,5	300	7760	
<b>Linia Cynkowania Ogniwego</b>										
325	Instalacja cynkowania ogniowego - odciąg nr 1	N 50°5'21,12"	E 20°5'35,40"	18	0,45	1 500	0,0	751	8760*	
326	Instalacja cynkowania ogniowego - odciąg nr 2	N 50°5'21,52"	E 20°5'36,25"	18	0,45	3 700	0,0	775	8760*	
327	Instalacja cynkowania ogniowego (pasywacja) - odciąg nr 3	N 50°5'21,81"	E 20°5'37,06"	9	0,84	12 500	0,0	305	8000	
328	Instalacja cynkowania ogniowego (piec redukcyjny) - odciąg nr 4	N 50°5'24,29"	E 20°5'42,48"	31	0,9	36 300	0,0	373	8760*	
<b>Źródła związane z instalacją cynkowania ogniowego</b>										
336	Szlifiernia wałków gumowych	N 50°5'13,31"	E 20°5'22,58"	21	0,8	4 000	0,0	293	600	
342	Srutownica wałców nr 1, 2	N 50°5'5,48"	E 20°4'38,72"	10	0,3	3 900	0,0	293	600	
362	Maszyna do teksturowania wałców (EDT) - odciąg 1	N 50°5'5,91"	E 20°4'36,45"	15	0,27	600	3,1	293	2500	
363	Maszyna do teksturowania wałców (EDT) - odciąg 2	N 50°5'5,27"	E 20°4'36,97"	17	0,27	500	2,6	293	2500	
<b>Linia Cynkowania Ogniwego nr 2</b>										
366	Piec do wyżarzania blach	N 50°5'17,56"	E 20°5'32,62"	43	1,70	50 000	14,0	623	8760*	
368	Suszarka gazowa	N 50°5'16,9"	E 20°5'31,14"	43	0,30	1 800	15,5	598	8760*	
<b>Linia Cynkowania Ogniwego nr 3</b>										
369	Piec do wyżarzania blach	N 50°5'16,88"	E 20°5'36,64"	20	1,70	50 000	14,0	623	8760*	
370	Suszarka gazowa nr 1	N 50°5'14,46"	E 20°5'30,62"	20	0,80	11 000	13,3	598	8760*	
371	Suszarka gazowa nr 2	N 50°5'13,82"	E 20°5'29,3"	20	0,80	5 500	6,7	598	8760*	

gdzie:

- h - wysokość emitora
- d - średnica wewnętrzna emitora
- V - przepływ gazów odlotowych
- V<sub>pión</sub> - prędkość wylotowa gazów
- T - temperatura wylotowa gazów
- \* - w przypadku roku przestępnego, czas pracy emitatorów jest dłuższy o 24 h

Źródło: [Pozwolenie zintegrowane 2022]

Załącznik 2. Warunki wprowadzania zanieczyszczeń do powietrza i charakterystyka miejsc wprowadzania gazów lub pyłów do powietrza przez zakład Elektrociepłownia Kraków

Nr emitora	Podłączone kotły	Współrzędne geograficzne		Charakterystyka emitora					Czas pracy
		Szer. geogr.	Dług. geogr.	Parametry emitora		Parametry gazów na wylocie z emitora			
				h	d	V	*V <sub>pion</sub>	T	
				[m]	[m]	[Nm <sup>3</sup> /h]	[m/s]	[K]	
E1A	OP-380 (K1)	N 50°03'13.52"	E 20°00'26.69"	120	7.7	463 000	3,8	327,15	8 500
	OP-380 (K2)					463 000	3,8	327,15	8 500
	OP-430 (K3)					438 000	3,6	327,15	7 000
	OP-430 (K4)					438 000	3,6	327,15	7 000
	WP-120 KW-5					211 568	1,74	327,15	2 400
E3	KO 1	N 50°03'16.71"	E 20°00'23.09"	54	1,4	37 336	11,5	413,15	< 1 500
	KO 3				1,4	37 336	11,5	413,15	
	KO 5				1,4	37 336	11,5	413,15	
	KO 8				1,4	37 336	11,5	413,15	
E4	KO 2	N 50°03'17.11"	E 20°00'23.06"	54	1,4	37 336	11,5	413,15	< 1 500
	KO 4				1,4	37 336	11,5	413,15	
	KO 6				1,4	37 336	11,5	413,15	
	KO 7				1,4	37 336	11,5	413,15	

gdzie:

h - wysokość emitora

d - średnica wewnętrzna emitora

V - przepływ gazów odlotowych

\*V<sub>pion</sub> - prędkość wylotowa spalin z emitora w przypadku pracy wyłącznie tego kotła; w przypadku równoczesnej pracy większej ilości kotłów, prędkość wylotowa spalin jest odpowiednio większa

T - temperatura wylotowa gazów.

od czasu obowiązywania konkluzji BAT tj. od 17 sierpnia 2021 r.							
Dopuszczalną wielkość emisji od dnia obowiązywania konkluzji BAT tj. od 17 sierpnia 2021 r. określono jako: średnią miesięczną wynikającą ze standardów emisyjnych: średnią roczną określoną jako graniczne wielkości emisyjne lub wartość wskaźnikową z konkluzji BAT; a także średnią dobową, którą określono jako graniczną wielkość emisyjną lub wartość 110% standardu emisyjnego, w zależności od tego, która z tych wartości stanowi wartość bardziej restrykcyjną. Dopuszczalną wielkość emisji ustalono z uwzględnieniem pierwszej zasady łączenia (art. 157a ust 2 pkt 1 ustawy POŚ) dla łącznej mocy cieplnej kotłów 1493 MW (E1A) oraz 148 MW dla E3 i E4. Kotły olejowe użytkowane < 1500 godzin/rok.							
Emitor/ podłączone kotły	Nazwa zanieczyszczenia	Średnia miesięczna - wynikająca ze standardu emisyjnego [mg/Nm <sup>3</sup> ] <sup>1)</sup>	Średnia dobowa - wynikająca z granicznych wielkości emisyjnych lub 110% standardu emisyjnego (wartość średniodobowa lub średnia z okresu pobierania próbek) [mg/Nm <sup>3</sup> ] <sup>1) 2)</sup>	Średnia roczna wynikająca z granicznych wielkości emisyjnych (średnia roczna lub średnia z próbek uzyskanych w ciągu jednego roku) [mg/Nm <sup>3</sup> ] <sup>1) 2)</sup>	Średnia roczna wynikająca z wartości wskaźnikowej z konkluzji BAT [mg/Nm <sup>3</sup> ] <sup>1) 2) 3)</sup>	Nr BAT	
Spalanie wyłącznie węgla kamiennego							
E1A	K1 K2 K3 K4	Dwutlenek siarki	200	205 <sup>4)</sup>	130	—	21
		Tlenki azotu jako NO <sub>2</sub>	200	200 <sup>4)</sup>	150	—	20
		Pył	20	14 <sup>4)</sup>	8	—	22
		Chlorowodór	—	—	5	—	21
		Fluorowodór	—	—	3	—	21
		Amoniak	—	—	10 <sup>5)</sup>	—	7
		Tlenek węgla	—	—	—	100	20
		Rtęć [µg/m <sup>3</sup> ]	—	—	4	—	23
	KW-5	Dwutlenek siarki	150	165 <sup>6)</sup>	130	—	21
		Tlenki azotu jako NO <sub>2</sub>	150	165 <sup>6)</sup>	150	—	20
		Pył	10	11 <sup>6)</sup>	8	—	22
		Chlorowodór	—	—	5	—	21
		Fluorowodór	—	—	3	—	21
		Amoniak	—	—	10 <sup>5)</sup>	—	7
Tlenek węgla	—	—	—	100	20		
Rtęć [µg/m <sup>3</sup> ]	—	—	4	—	23		

Współspalanie węgla kamiennego i biomasy (do 20% udziału energetycznego)							
E1A	K2	Dwutlenek siarki	200	181 dla zaw. S < 0,1% 207 <sup>7)</sup> dla zaw. S ≥ 0,1%	117 dla zaw. S < 0,1% 124 <sup>7)</sup> dla zaw. S ≥ 0,1%	—	21,25
		Tlenki azotu jako NO <sub>2</sub>	200	200	152	—	20,24
		Pył	20	14	8	—	22,26
		Chlorowodór	—	12	5	—	21,25
		Fluorowodór	—	—	3	—	21,25
		Amoniak	—	—	11 <sup>5)</sup>	—	7
		Tlenek węgla	—	—	—	96	20,24
		Rtęć [µg/m <sup>3</sup> ]	—	—	4	—	23,27
Spalanie wyłącznie oleju lekkiego							
E3	KO 1 KO 3 KO 5 KO 8	Dwutlenek siarki	200	200	nie ma zastosowania obiekt użytkowany ≤ 1500 h/rok	—	29
		Tlenki azotu jako NO <sub>2</sub>	150	145 <sup>4)</sup>		—	28
		Pył	20	22		—	30
E4	KO 2 KO 4 KO 6 KO 7	Dwutlenek siarki	200	200	nie ma zastosowania obiekt użytkowany ≤ 1500 h/rok	—	29
		Tlenki azotu jako NO <sub>2</sub>	150	145 <sup>4)</sup>		—	28
		Pył	20	22		—	30

gdzie:

- 1) Stężenie substancji w gazie suchym w warunkach umownych (ciśnienie 101,3 kPa, temperatura 273 K) przy zawartości tlenu 6 % w gazach odlotowych dla węgla kamiennego i biomasy oraz 3 % dla oleju.
- 2) W przypadku prowadzenia pomiarów ciągłych podane wartości dotyczą średniej dobowej lub rocznej, natomiast w przypadku prowadzenia pomiarów okresowych, są to: średnia z okresu pobierania próbek lub średnia z próbek uzyskanych w ciągu jednego roku.
- 3) Wartość wskaźnikowa, nie stanowi BAT AELs
- 4) Górna granica zakresu BAT-AEL
- 5) Średnia roczna lub średnia z okresu pobierania próbek
- 6) 110% standardu emisyjnego
- 7) W przypadku współspalania biomasy o zawartości siarki wagowo ≥ 0,1 % suchej masy (wówczas Sr dla biomasy wynosi 100 mg/Nm<sup>3</sup> a Sd 215 mg/Nm<sup>3</sup>)

Źródło: [Pozwolenie zintegrowane 2020]

Załącznik 3. Warunki wprowadzania zanieczyszczeń do powietrza i charakterystyka miejsc wprowadzania gazów lub pyłów do powietrza przez zakład Ekospalarnia Kraków

1. Parametry emitorów: E-1 linii nr 1 oraz E-2 linii nr 2, do termicznego przekształcania odpadów

Oznaczenie	Opis	Wysokość	Średnica	Temp. gazów na wylocie	Prędkość gazów na wylocie	Czas pracy	Typ
		m	m	K	m/s	h/rok	
E-1	Linia nr 1 do termicznego przekształcania odpadów	70	1,6	414	15,1	8 424	otwarty
E-2	Linia nr 2 do termicznego przekształcania odpadów						

2. Parametry emitora E-3 z kolumny dezodoryzacyjnej oczyszczającej powietrze złowne

Oznaczenie	Opis	Wysokość	Średnica	Temp. gazów na wylocie	Prędkość gazów na wylocie	Czas pracy	Typ
		m	m	K	m/s	h/rok	
E-3	Wylot z kolumny dezodoryzacyjnej oczyszczającej powietrze złowne	41	1,15	281,5	8,8	3 000	boczny

3. Parametry emitorów E-4A, E-4B, E-4C z budynku gospodarki odpadami procesowymi, w którym realizowany jest proces waloryzacji żużli i proces stabilizowania i zestalania popiołów lotnych i pozostałości z oczyszczania salin

Oznaczenie	Opis	Wysokość	Średnica	Temp. gazów na wylocie	Prędkość gazów na wylocie	Czas pracy	Typ
		m	m	K	m/s	h/rok	
E-4A	Wylot z budynku gospodarki pozostałościami procesowymi	29,5	1,125 x 1,125	291	1,21	3 120	boczny
E-4B		28,8					
E-4C		28					

4. Parametry emitora E-7 z agregatu awaryjnego

Oznaczenie	Opis	Wysokość	Średnica	Temp. gazów na wylocie	Prędkość gazów na wylocie	Czas pracy	Typ
		m	m	K	m/s	h/rok	
E-7	Agregat awaryjny	30	0,35	743	45	336	otwarty

Źródło [Pozwolenie zintegrowane 2021]

Załącznik 4. Dane meteorologiczne w czasie pomiarów metodą automatyczną (Balice)

Lp	Data	Godzina	Temperatura [°C] na wysokości 2 m	Zachmurzenie [%]	Ciśnienie atmosferyczne [hPa]	Prędkość wiatru [km/h] na wysokości 10 m	Kierunek wiatru [°] na wysokości 10 m	Wilgotność względna [%] na wysokości 2 m	Opady deszczu [mm]
			godzinowa	godzinowa	godzinowa	godzinowa	godzinowa	godzinowa	godzinowa
1	17.03.2021	12:00	5,54	13	1013,7	31,90	343,61047	59	0
2	18.03.2021	12:00	1,59	21	1017,9	18,58	351,08508	51	0
3	19.03.2021	12:00	1,68	57	1017,7	3,98	354,8056	56	0
4	20.03.2021	12:00	1,69	29	1024,2	15,11	347,61926	55	0
5	21.03.2021	12:00	2,24	100	1014,1	47,25	250,87477	42	0
6	22.03.2021	12:00	3,65	100	1016,8	38,14	17,57985	42	0
7	23.03.2021	12:00	7,79	58	1018,9	34,39	312,8789	56	0
8	24.03.2021	12:00	7,71	100	1022,5	11,75	27,349869	44	0
9	25.03.2021	12:00	9,05	24	1021,5	2,62	344,0546	52	0
10	26.03.2021	12:00	13,74	97	1023,1	4,45	194,03624	44	0
11	27.03.2021	12:00	17,00	100	1016,6	29,88	211,20052	39	0
12	28.03.2021	12:00	8,40	43	1030,8	20,89	268,0251	46	0
13	29.03.2021	12:00	13,97	100	1029,1	24,52	273,36646	54	0
14	30.03.2021	12:00	16,77	100	1030,8	14,37	292,0679	68	0
15	31.03.2021	12:00	19,79	10	1024,7	8,67	265,23636	54	0
16	01.04.2021	12:00	21,85	10	1014,1	21,65	273,8141	38	0
17	02.04.2021	12:00	10,73	0	1015,2	16,22	2,5447998	39	0
18	03.04.2021	12:00	6,72	100	1011,6	16,12	299,42746	70	0,3
19	04.04.2021	12:00	6,68	10	1019,6	14,06	357,06433	45	0
20	05.04.2021	12:00	12,78	31	1001,3	43,49	233,41469	41	0
21	06.04.2021	12:00	4,73	10	1004,2	41,55	242,10274	36	0
22	07.04.2021	12:00	1,51	80	1006	30,82	292,67136	71	0,5
23	08.04.2021	12:00	5,71	10	1015,5	42,26	290,4418	55	0
24	09.04.2021	12:00	9,65	7	1023,5	47,59	216,69653	37	0

Lp	Data	Godzina	Temperatura [°C] na wysokości 2 m	Zachmurzenie [%]	Ciśnienie atmosferyczne [hPa]	Prędkość wiatru [km/h] na wysokości 10 m	Kierunek wiatru [°] na wysokości 10 m	Wilgotność względna [%] na wysokości 2 m	Opady deszczu [mm]
			godzinowa	godzinowa	godzinowa	godzinowa	godzinowa	godzinowa	godzinowa
25	10.04.2021	12:00	18,15	0,6	1017,7	21,71	229,70786	31	0
26	11.04.2021	12:00	17,93	100	1017,5	29,09	192,14427	37	0
27	12.04.2021	12:00	19,92	100	1015,5	24,01	246,12473	41	0
28	13.04.2021	12:00	0,75	100	1026,1	30,26	357,9546	94	1,7
29	14.04.2021	12:00	3,61	100	1020,5	28,50	333,75867	81	0,3
30	15.04.2021	12:00	4,78	100	1018,6	24,95	315	75	0
31	16.04.2021	12:00	8,59	100	1016,6	23,98	311,34778	69	0,1
32	17.04.2021	12:00	12,21	100	1017	11,02	321,6325	60	0
33	18.04.2021	12:00	12,91	100	1017,6	20,68	58,523155	55	0
34	19.04.2021	12:00	10,26	100	1014,6	20,97	74,054596	76	0
35	20.04.2021	12:00	11,90	10	1013,5	13,49	43,919083	58	0

Źródło: [www.meteoblue.pl]

Załącznik 5. Dane meteorologiczne w czasie pomiarów metodą grawimetryczną (Kraków, ul. Bulwarowa)

Lp	Data	Temperatura [°C] na wysokości 2 m			Zachmurzenie [%]	Ciśnienie atmosferyczne [hPa]			Prędkość wiatru [km/h] na wysokości 10 m			Kierunek wiatru [°] na wysokości 10 m	Wilgotność względna [%] na wysokości 2 m			Opady deszczu [mm]
		Max	Min	Średnia	Średnia	Max	Min	Średnia	Max	Min	Średnia	Średnia	Max	Min	Średnia	Średnia
1	01.08.2022	27,066042	12,446041	20,81979	44,333332	1016,2	1012,7	1013,74164	17,884428	5,4119864	11,522194	294,20654	97	33	64,041664	0,2
2	02.08.2022	26,386042	16,356041	21,743544	43,291668	1018,8	1016,3	1017,6833	14,021525	5,6002855	9,297676	310,38712	87	44	63,833332	0,2
3	03.08.2022	29,67604	16,276041	23,867292	10,587501	1020	1016,7	1018,47504	9,178235	1,1384199	5,4214916	239,16965	82	29	51,375	0,0
4	04.08.2022	31,316042	17,32604	25,161871	1,2583333	1019,4	1015,4	1017,53326	13,32	0,71999997	6,8123736	118,99596	72	23	44,166668	0,0
5	05.08.2022	33,99604	16,456041	26,746038	0,16250001	1016,9	1011,9	1014,2168	9,339208	2,5959969	6,5327163	159,24167	64	24	40,25	0,0
6	06.08.2022	26,536041	18,66604	22,161041	67,52917	1021,3	1012,6	1017,79596	29,69727	3,219938	17,19272	326,01642	71	46	58,291668	0,0
7	07.08.2022	25,366041	15,176041	20,529373	47,587505	1023,8	1019,9	1021,5791	21,42227	12,0694	16,717196	34,228165	60	20	37,833332	0,0
8	08.08.2022	26,546041	13,486041	20,863123	63,912502	1022,5	1020,4	1021,35016	19,592731	5,8603754	12,712636	51,703827	60	24	39,541668	0,0
9	09.08.2022	26,66604	13,246041	21,368958	59,25	1024,4	1022,1	1023,3291	21,38897	12,24	16,641932	39,62642	73	28	43,458332	0,0
10	10.08.2022	25,446041	16,286041	21,76396	72,375	1025,5	1022,2	1023,72064	21,94524	8,311245	14,98605	29,277588	62	30	42,291668	0,0
11	11.08.2022	23,83604	17,726042	20,970625	60,958332	1023,4	1020,4	1021,8958	23,749088	4,072935	12,620254	49,164078	59	35	44,916668	0,0
12	12.08.2022	28,776041	15,136041	22,669373	36,541668	1021,1	1017,3	1018,98334	22,89611	2,1897945	12,720082	63,984863	68	28	47,125	0,4
13	13.08.2022	23,93604	17,93604	20,337706	94,875	1017,6	1013,8	1015,1458	21,734581	2,5959969	13,046936	48,696136	93	62	78,958336	10,7
14	14.08.2022	27,226042	16,146042	22,99604	34,145832	1013,7	1008,5	1010,4751	11,753876	2,5959969	8,491729	58,392494	94	45	65,791664	0,9
15	15.08.2022	31,32604	16,956041	25,317709	5,0833335	1008,2	1005,3	1006,8752	9,387651	1,2979984	5,5160623	208,28629	85	28	51,583332	0,0
16	16.08.2022	29,75604	18,946041	25,437706	38,458332	1010,1	1007,3	1008,3958	10,630672	1,08	4,843472	322,65063	69	34	47,541668	0,4
17	17.08.2022	31,66604	17,036041	25,77479	4,875	1011,9	1009,8	1010,4834	20,49156	6,489992	10,907163	335,28064	82	31	50,208332	0,0
18	18.08.2022	32,63604	18,386042	26,28271	3,404167	1013,3	1011,1	1011,8748	14,145756	6,151683	9,660012	103,42071	81	31	51,083332	0,0
19	19.08.2022	36,13604	17,946041	28,318125	7,304167	1012,8	1008,9	1010,7292	20,275385	4,2136917	9,217923	115,14184	83	23	46,583332	0,0
20	20.08.2022	29,456041	19,796041	24,395208	76,5375	1012,5	1009,9	1011,05414	30,096085	2,8116899	12,943854	284,81097	92	45	67,333336	1,5
21	21.08.2022	29,716042	18,866041	23,311876	85,20417	1010,3	1007,6	1009,46655	24,967499	5,8603754	15,24315	300,3484	96	46	70,708336	0,0
22	22.08.2022	30,216042	18,16604	23,48771	61,254166	1011,7	1008,6	1010,13745	13,1041975	3,8773184	8,426928	356,98724	95	33	66,083336	2,1
23	23.08.2022	29,876041	16,446041	22,397707	43,15833	1016,4	1011,5	1013,7583	20,06334	1,5273507	9,517457	250,63025	96	39	71,666664	4,4
24	24.08.2022	30,83604	16,23604	24,808123	21,279167	1017,9	1015,4	1016,4124	12,661564	1,9386592	8,109703	283,85474	94	35	59,833332	0,4
25	25.08.2022	33,92604	18,876041	26,383543	1,8166667	1016,6	1013	1014,8042	14,081478	2,0991426	8,246921	71,650185	70	20	43,666668	0,0

Lp	Data	Temperatura [°C] na wysokości 2 m			Zachmurzenie [%]	Ciśnienie atmosferyczne [hPa]			Prędkość wiatru [km/h] na wysokości 10 m			Kierunek wiatru [°] na wysokości 10 m	Wilgotność względna [%] na wysokości 2 m			Opady deszczu [mm]
		Max	Min	Średnia	Średnia	Max	Min	Średnia	Max	Min	Średnia	Średnia	Max	Min	Średnia	Średnia
26	26.08.2022	32,556038	16,816042	25,343956	10,833333	1014,3	1010,7	1012,4373	17,917007	4,32	10,312869	83,953514	46	17	30,625	0,0
27	27.08.2022	32,40604	17,956041	25,716455	38,458332	1013	1009,1	1010,9959	22,79684	1,609969	9,924082	253,80127	66	16	32,791668	0,0
28	28.08.2022	28,446041	18,036041	22,620626	86,424995	1015,7	1012,2	1013,7417	18,72346	1,2979984	8,586776	277,9912	88	40	65,083336	3,7
29	29.08.2022	26,126041	14,276041	20,970205	36,625	1019,5	1015,5	1017,4624	17,709658	8,373386	13,302863	292,80908	96	41	65,666664	0,0
30	30.08.2022	25,82604	11,806041	19,647291	4,6458335	1020,7	1017,5	1019,0332	15,192682	6,9899354	10,6951475	304,57108	80	40	57,791668	0,0
31	31.08.2022	23,066042	13,056041	18,679375	49,1375	1020,9	1018,1	1019,4626	17,87718	7,8954163	12,07318	24,345917	81	36	55	0,0
32	01.09.2022	22,356041	14,826041	18,264376	64	1020,8	1018,3	1019,47504	18,0036	7,5942082	14,133241	24,45932	54	26	41,75	0,0
33	02.09.2022	22,50604	10,126041	16,856041	13,608334	1022,2	1017,3	1019,9666	23,023119	2,52	15,39983	65,398895	68	27	43,375	0,0
34	03.09.2022	22,296041	8,246041	15,307709	20,895834	1020,8	1017,3	1019,34174	23,219301	10,948973	15,932368	81,91033	82	38	54,5	0,0
35	04.09.2022	22,50604	7,856041	16,039791	72,04583	1023,9	1019,8	1021,6585	13,1041975	2,4149535	8,654338	35,578247	92	36	65,166664	0,0
36	05.09.2022	23,84604	12,656041	19,07479	44,158337	1024,9	1022,8	1023,9417	14,830076	2,5455842	10,110551	66,30578	71	26	48	0,0
37	06.09.2022	23,51604	8,386041	17,01104	35,720833	1024,5	1019,2	1021,86237	22,007162	12,496718	15,820544	75,54366	63	25	38,875	0,0
38	07.09.2022	26,08604	7,686041	18,081877	7,3250003	1020,3	1015	1017,3042	15,546833	1,8	9,400475	75,45036	58	28	40,541668	0,0
39	08.09.2022	29,046041	11,416041	20,986456	42,833332	1015,3	1009,2	1011,7083	18,03237	7,928178	11,383363	133,17445	78	32	47,041668	3,6
40	09.09.2022	25,606041	15,156041	20,631458	56,020832	1014,1	1012	1013,0334	19,813087	2,16	8,7305	285,85654	95	31	60	0,1
41	10.09.2022	18,056042	11,286041	15,679793	79,05834	1012,9	1009,5	1011,48334	16,954432	4,6800003	11,333785	294,099	90	53	77,583336	9,1
42	11.09.2022	18,546041	10,516041	14,726457	81,14167	1013	1010,5	1011,8167	26,67889	9,779817	17,808569	277,52658	91	58	79,291664	2,5
43	12.09.2022	19,93604	8,2960415	14,900207	35,55	1015,2	1012,2	1013,9333	26,36616	7,42159	16,771097	302,42227	92	39	63,791668	0,0
44	13.09.2022	22,01604	7,726041	16,308125	33,3625	1014,7	1008	1011,55005	17,555305	6,28713	11,268058	250,23401	92	36	59,958332	0,0
45	14.09.2022	23,23604	14,306041	17,98479	79,137505	1007,7	1002,9	1005,37933	27,059933	1,4399999	13,193154	250,58609	94	50	68,916664	2,2
46	15.09.2022	21,556042	15,506041	18,031458	85,26667	1003,5	1000,3	1001,8584	30,926489	4,8965297	15,375087	262,6708	98	59	82,833336	27,3
47	16.09.2022	18,75604	11,426041	15,319374	59,3125	1006,8	1004	1005,63336	25,671307	8,28	17,007193	261,86264	88	43	63,416668	0,0
48	17.09.2022	17,32604	7,066041	12,923957	67,458336	1007,1	1002,1	1004,5457	26,525429	8,350138	15,272727	279,0877	88	42	61,833332	0,0
49	18.09.2022	13,156041	5,126041	10,273541	73,833336	1007,7	1001,3	1004,33325	32,55363	10,483357	22,928362	284,37256	85	54	72,75	1,7
50	19.09.2022	12,866041	4,246041	9,447291	80,291664	1012,7	1006	1009,375	25,984917	6,519877	17,309721	274,84314	88	52	72,208336	0,9
51	20.09.2022	13,846041	8,536041	11,215625	60,916668	1018,6	1012,3	1015,48737	20,523157	11,304229	15,686009	289,36322	92	58	73,583336	0,3
52	21.09.2022	13,816041	7,0360413	11,261043	63,791668	1022,8	1019,3	1021,35834	22,218153	9,885262	14,931689	317,10583	84	56	68,958336	1,1

Lp	Data	Temperatura [°C] na wysokości 2 m			Zachmurzenie [%]	Ciśnienie atmosferyczne [hPa]			Prędkość wiatru [km/h] na wysokości 10 m			Kierunek wiatru [°] na wysokości 10 m	Wilgotność względna [%] na wysokości 2 m			Opady deszczu [mm]
		Max	Min	Średnia	Średnia	Max	Min	Średnia	Max	Min	Średnia	Średnia	Max	Min	Średnia	Średnia
53	22.09.2022	14,276041	10,206041	11,937291	78,42917	1022,9	1021,2	1022,0417	15,315873	7,7043357	12,172088	328,9116	69	52	60,875	0,0
54	23.09.2022	15,446041	8,986041	12,2456255	79,791664	1021,8	1017,1	1019,33746	12,43434	4,1046314	8,873209	296,0795	68	43	55,958332	0,0
55	24.09.2022	18,196041	5,466041	12,561039	63,645832	1017,7	1014,1	1015,6958	8,373386	1,1384199	5,4828334	171,50143	82	36	55,791668	0,0
56	25.09.2022	21,136042	5,546041	14,3810425	50,979168	1015,1	1008,7	1011,7917	13,830749	1,484318	7,036781	230,44034	91	36	63,416668	2,5
57	26.09.2022	16,66604	10,496041	13,818958	69,375	1007,5	1003,3	1005,07495	11,298495	2,8116899	6,2896867	222,42441	96	66	82,041664	17,3
58	27.09.2022	20,01604	7,136041	13,067291	58,94583	1003,2	996,5	999,2751	27,14123	0	9,504285	207,18527	88	40	72,291664	2,6
59	28.09.2022	18,046041	7,726041	12,906875	60,708332	1000,5	997,8	999,3459	26,178707	6,297428	18,162588	231,02475	92	40	65,291664	1,6
60	29.09.2022	14,596041	9,836041	11,582292	81,808334	1007,6	1000,8	1004,24164	12,224107	2,968636	7,9099545	133,41763	88	61	77,458336	6,4
61	30.09.2022	13,436041	9,236041	11,270625	100	1014,3	1007,5	1010,35834	13,70839	1,484318	8,190255	50,30092	93	84	89,166664	5,7
62	01.10.2022	18,706041	10,536041	13,901875	92,625	1014,4	1007,5	1010,7292	27,943514	3,6	11,984719	233,1301	96	60	79,458336	0,4
63	02.10.2022	16,716042	10,326041	12,784373	58,733334	1013,4	1009,5	1011,8582	32,283787	16,327497	24,995079	276,4666	92	48	71,375	0,0

Źródło: [www.meteoblue.pl]

Załącznik 6. Wyniki pomiarów pyłów PM<sub>2,5</sub> metodą automatyczną (Balice)

L.p.	Data	Godzina	Zmierzona wartość PM <sub>2,5</sub> [µg/m <sup>3</sup> ]	Niepewność pomiaru [µg/m <sup>3</sup> ]
1	17.03.2021	12:00	15	0,9
2	18.03.2021	12:00	14	0,8
3	19.03.2021	12:00	14	0,8
4	20.03.2021	12:00	13	0,8
5	21.03.2021	12:00	14	0,8
6	22.03.2021	12:00	16	0,9
7	23.03.2021	12:00	20	1,2
8	24.03.2021	12:00	28	1,6
9	25.03.2021	12:00	30	1,7
10	26.03.2021	12:00	40	2,3
11	27.03.2021	12:00	35	2,0
12	28.03.2021	12:00	22	1,3
13	29.03.2021	12:00	15	0,9
14	30.03.2021	12:00	33	1,9
15	31.03.2021	12:00	19	1,1
16	01.04.2021	12:00	29	1,7
17	02.04.2021	12:00	26	1,5
18	03.04.2021	12:00	19	1,1
19	04.04.2021	12:00	20	1,2
20	05.04.2021	12:00	16	0,9
21	06.04.2021	12:00	18	1,0
22	07.04.2021	12:00	19	1,1
23	08.04.2021	12:00	11	0,6
24	09.04.2021	12:00	13	0,8
25	10.04.2021	12:00	18	1,0
26	11.04.2021	12:00	5	0,3
27	12.04.2021	12:00	14	0,8
28	13.04.2021	12:00	12	0,7
29	14.04.2021	12:00	10	0,6
30	15.04.2021	12:00	11	0,6
31	16.04.2021	12:00	10	0,6
32	17.04.2021	12:00	16	0,9
33	18.04.2021	12:00	19	1,1
34	19.04.2021	12:00	20	1,2
35	20.04.2021	12:00	34	2,0

Źródło: opracowanie własne

Załącznik 7. Wyniki pomiarów pyłów PM<sub>2,5</sub> metodą grawimetryczną (Kraków, ul. Bulwarowa)

L.p.	Masa filtra przed ekspozycją [µg]	Data i godzina ważenia po ekspozycji	Objętość zassanego powietrza	Masa pyłu [mg]	Pył PM <sub>2,5</sub> [µg/m <sup>3</sup> ]
1	146881,00	20.08.2022 15:06	54,9	0,642	11,69398907
2	148193,00	20.08.2022 15:40	54,9	0,798	14,53551913
3	147118,00	20.08.2022 18:13	54,9	0,875	15,93806922
4	149689,00	20.08.2022 18:16	54,9	0,932	16,97632058
5	145640,00	20.08.2022 18:18	54,9	1,029	18,7431694
6	147450,00	20.08.2022 18:20	54,9	0,71	12,93260474
7	148144,00	20.08.2022 18:22	54,9	0,446	8,123861566
8	146852,00	20.08.2022 18:24	54,9	0,463	8,433515483
9	146591,00	20.08.2022 18:26	54,9	0,495	9,016393443
10	148061,00	20.08.2022 18:28	54,9	0,542	9,872495446
11	146985,00	20.08.2022 18:30	54,9	0,526	9,581056466
12	149027,00	20.08.2022 18:32	54,9	0,652	11,87613843
13	148262,00	20.08.2022 18:34	54,9	0,672	12,24043716
14	147779,00	20.08.2022 18:37	54,9	0,687	12,5136612
15	149330,00	20.08.2022 18:39	54,9	1,098	20
16	147502,00	20.08.2022 18:41	54,9	1,057	19,25318761
17	146685,00	03.09.2022 16:37	54,9	1,089	19,83606557
18	149779,00	03.09.2022 16:39	54,9	1,002	18,25136612
19	149225,00	05.09.2022 10:36	54,9	1,102	20,07285974
20	148824,00	03.09.2022 16:44	54,9	0,747	13,60655738
21	149098,00	03.09.2022 16:50	54,9	0,646	11,76684882
22	148271,00	03.09.2022 16:51	54,9	0,5	9,107468124
23	148026,00	03.09.2022 16:53	54,9	0,597	10,87431694
24	148805,00	03.09.2022 16:55	54,9	0,797	14,51730419
25	147929,00	03.09.2022 16:58	54,9	1,073	19,54462659
26	148057,00	03.09.2022 17:00	54,9	1,003	18,26958106
27	149888,00	03.09.2022 17:02	54,9	1,024	18,65209472
28	149333,00	03.09.2022 17:04	54,9	0,765	13,93442623
29	148959,00	03.09.2022 17:06	54,9	0,684	12,45901639
30	149591,00	03.09.2022 17:09	54,9	0,676	12,3132969
31	148333,00	28.09.2022 08:34	54,9	0,447	8,142076503
32	148466,00	28.09.2022 08:36	54,9	0,429	7,81420765
33	148118,00	28.09.2022 08:41	54,9	0,426	7,759562842
34	148862,00	28.09.2022 08:43	54,9	0,495	9,016393443
35	149242,00	28.09.2022 08:45	54,9	0,585	10,6557377
36	148784,00	28.09.2022 08:48	54,9	0,699	12,73224044
37	148621,00	28.09.2022 08:51	54,9	0,696	12,67759563
38	148552,00	28.09.2022 08:53	54,9	0,906	16,50273224
39	150144,00	28.09.2022 08:58	54,9	0,622	11,32969035
40	148253,00	28.09.2022 08:56	54,9	1,095	19,94535519
41	149041,00	28.09.2022 09:00	54,9	0,626	11,40255009
42	149810,00	28.09.2022 09:02	54,9	0,379	6,903460838
43	148769,00	28.09.2022 09:05	54,9	0,504	9,180327869

L.p.	Masa filtra przed ekspozycją [µg]	Data i godzina ważenia po ekspozycji	Objętość zassanego powietrza	Masa pyłu [mg]	Pył PM2,5 [µg/m <sup>3</sup> ]
44	149105,00	28.09.2022 09:07	54,9	0,627	11,42076503
45	149214,00	03.10.2022 14:47	54,9	0,709	12,9143898
46	149324,00	03.10.2022 14:49	54,9	0,493	8,97996357
47	149328,00	03.10.2022 14:53	54,9	0,524	9,544626594
48	149072,00	03.10.2022 14:55	54,9	0,496	9,034608379
49	149126,00	03.10.2022 14:57	54,9	0,304	5,537340619
50	149733,00	03.10.2022 14:59	54,9	0,344	6,265938069
51	150418,00	03.10.2022 15:02	54,9	0,46	8,378870674
52	148867,00	03.10.2022 15:04	54,9	0,535	9,744990893
53	149110,00	03.10.2022 15:06	54,9	0,487	8,870673953
54	150391,00	03.10.2022 15:09	54,9	0,731	13,3151184
55	147730,00	03.10.2022 15:11	54,9	0,96	17,4863388
56	149699,00	03.10.2022 13:27	54,9	0,484	8,816029144
57	147974,00	03.10.2022 15:16	54,9	1,331	24,24408015
58	146976,00	03.10.2022 15:18	54,9	0,792	14,42622951
59	148351,00	13.10.2022 17:35	54,9	0,424	7,723132969
60	147097,00	03.10.2022 14:45	54,9	0,05	ŚLEPA
61	148842,00	13.10.2022 17:37	54,9	0,334	6,083788707
62	147119,00	13.10.2022 17:39	54,9	0,596	10,856102
63	148305,00	13.10.2022 17:41	54,9	0,762	13,87978142
64	148232,00	13.10.2022 17:43	54,9	0,26	4,735883424

Źródło: opracowanie własne

Załącznik 8. Wyniki oznaczeń niklu, arsenu, kadmu i ołowiu w pyłe zawieszonym PM<sub>2,5</sub>

Data	Tydzień	Nikiel [ng/m <sup>3</sup> ]				Arsen [ng/m <sup>3</sup> ]			
		I	II	III	Średnia	I	II	III	Średnia
1.08-07.08	I	0,835155	0,787543	0,785432	0,80271	0,58743169	0,593432	0,581432	0,587432
08.08-14.08	II	0,539292	0,539291	0,543211	0,540598	0,2179287	0,213929	0,221929	0,217929
14.08-21.08	III	0,645199	0,647321	0,641235	0,644585	0,44119178	0,447192	0,435192	0,441192
22.08-28.08	IV	0,51223	0,514321	0,518432	0,514994	0,45680458	0,453805	0,459805	0,456805
29.08-4.09	V	0,540853	0,538123	0,534568	0,537848	0,36364819	0,369648	0,357648	0,363648
5.09-11.09	VI	0,580406	0,583235	0,577654	0,580432	0,60044236	0,605442	0,595442	0,600442
12.09-18.09	VII	0,442493	0,446543	0,448765	0,445934	0,35063752	0,345638	0,355638	0,350638
19.09-25.09	VIII	0,53617	0,539877	0,53211	0,536052	0,437809	0,433809	0,441809	0,437809
26.09-2.10	IX	0,614494	0,616235	0,612346	0,614358	0,58430913	0,579309	0,589309	0,584309
Data	Tydzień	Kadm [ng/m <sup>3</sup> ]				Ołów [ug/m <sup>3</sup> ]			
		I	II	III	Średnia	I	II	III	Średnia
1.08-07.08	I	0,156258	0,142394	0,146498	0,148383	0,02284348	0,023251	0,022315	0,022803
08.08-14.08	II	0,079755	0,087432	0,087631	0,08494	0,00700898	0,007409	0,006659	0,007026
14.08-21.08	III	0,21975	0,199875	0,203393	0,207673	0,01085909	0,011401	0,010316	0,010859
22.08-28.08	IV	0,155738	0,146612	0,166126	0,156159	0,00904541	0,009498	0,008594	0,009046
29.08-4.09	V	0,157559	0,169235	0,169728	0,165507	0,00856453	0,008993	0,007836	0,008464
5.09-11.09	VI	0,276997	0,259348	0,298687	0,278344	0,03346513	0,034138	0,032792	0,033465
12.09-18.09	VII	0,172912	0,188203	0,189948	0,183688	0,00407559	0,004279	0,003872	0,004076
19.09-25.09	VIII	0,345954	0,319293	0,374149	0,346465	0,00679794	0,007138	0,006548	0,006828
26.09-2.10	IX	0,264767	0,24519	0,24058	0,250179	0,0128375	0,013479	0,012199	0,012838

Źródło: opracowanie własne