

PROBLEMY OCHRONY I INŻYNIERII ŚRODOWISKA

Pod redakcją naukową
Mariana Banasia



WYDAWNICTWA AGH
KRAKÓW 2023

Tomasz Bergier, Robert Cichowicz, Maciej Dobrzański,
Mateusz Jakubiak, Tomasz Jerominko, Karolina Józwiakowska,
Katarzyna Lisik, Mykhaylo Lobur, Monika Łągiewka,
Mykhaylo Melnyk, Henryk Noga, Małgorzata Piaskowska-Silarska,
Krzysztof Pytel, Aleksandra Wagner, Andriy Zdobytskyi

PROBLEMY OCHRONY I INŻYNIERII ŚRODOWISKA

Pod redakcją naukową
Mariana Banasia



WYDAWNICTWA AGH

KRAKÓW 2023

Wydawnictwa Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie

© Wydawnictwa AGH, Kraków 2023

Publikacja może być rozpowszechniana zgodnie z licencją Creative Commons CC BY 4.0.

ISBN 978-83-67427-76-0

e-ISBN 978-83-67427-77-7

DOI: <https://doi.org/10.7494/978-83-67427-77-7>

Dyrektor Wydawnictw AGH: *Jan Sas*

Komitet Naukowy Wydawnictw AGH:

Marek Gorgoń (przewodniczący)

Barbara Gąciarz

Elżbieta Pamuła

Bogdan Sapiński

Stanisław Stryczek

Tadeusz Telejko

Recenzenci: *dr hab. inż. Marek Aleksander*

prof. dr hab. Jan Suchanicz

Redakcja naukowa: *Marian Banaś*

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

Katedra Systemów Energetycznych i Urządzeń Ochrony Środowiska

Redakcja: *Joanna Ciągala*

Korekta: *Magdalena Grzech, Monika Filipek, Joanna Ciągala*

Projekt okładki i strony tytułowej: *Paweł Sepielak*.

Na okładce wykorzystano grafikę wygenerowaną przez AI.

Skład: *Munda Maciej Torz*

Wydawnictwa AGH

al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

tel. 12 617 32 28, 12 636 40 38

e-mail: redakcja@wydawnictwoagh.pl

www.wydawnictwo.agh.edu.pl

Spis treści

Wstęp	5
Monika Łągiewka, Tomasz Bergier Adaptacja do zmian klimatu. Projekt i ocena elementów błękitno-zielonej infrastruktury w wybranej lokalizacji Krakowa	7
Maciej Dobrzański, Robert Cichowicz Analiza przestrzenna dyspersji zanieczyszczeń powietrza wzdłuż wybranego ciągu komunikacyjnego aglomeracji miejskiej	19
Tomasz Jerominko, Katarzyna Lisik, Robert Cichowicz Poziom stężenie zanieczyszczeń w pomieszczeniach dydaktycznych uczelni wyższej w budynku po termomodernizacji	35
Aleksandra Wagner Przemiany zbiorników wodnych w Krakowie i okolicy w latach 1999–2023 ...	45
Aleksandra Wagner Znaczenie roślinności wieloletniej oraz łąk kwietnych w urządzaniu zieleni miejskiej na przykładzie parku Krakowskiego i parku Jordana w Krakowie	61
Tomasz Bergier, Mateusz Jakubiak, Karolina Jóźwiakowska Internetowa platforma wiedzy na temat oczyszczalni hydrofitowych – <i>Constructed Wetlands Knowledge Platform</i>	69
Krzysztof Pytel, Małgorzata Piaskowska-Silarska, Mykhaylo Lobur Efekt wprowadzenia zakazu palenia węglem na wybranym obszarze miejskim	85
Krzysztof Pytel, Henryk Noga, Mykhaylo Melnyk Wpływ zanieczyszczenia powietrza na zdrowie i środowisko naturalne oraz wybrane działania prewencyjne	95
Krzysztof Pytel, Henryk Noga, Andriy Zdobyt'skyi Trendy zanieczyszczenia powietrza na obszarze miejskim na podstawie danych ze stacji pomiarowych	103

WSTĘP

Z jednej strony rozwój cywilizacyjny stanowi fundamentalny aspekt postępu, związany nie tylko z wyznacznikami ekonomicznymi, lecz także z postępowaniem w dziedzinie techniki, nauki oraz szeroko pojętego funkcjonowania społeczeństwa. Zmniejszenie tempa tego rozwoju nie tylko mogłoby spowodować stagnację, lecz wręcz regres dotyczący wszystkich obszarów ludzkiej działalności. Z drugiej jednak strony rozwój cywilizacyjny, choć jest niezbędny, wiąże się z wywieraniem znaczącego, często negatywnego, wpływu na środowisko. Skutkuje to jego przekształcaniem w zaskakująco szybkim tempie i wyczerpywaniem zasobów naturalnych, a w konsekwencji – pogorszeniem jego stanu. Aby i przyszłe pokolenia mogły korzystać z bogactwa środowiskowego odziedziczonych po naszych przodkach, niezbędne jest podejmowanie działań, które zapewnią równowagę pomiędzy potrzebami związanymi z rozwojem cywilizacji a dbałością o zachowanie środowiska naturalnego w optymalnym stanie.

Konieczne jest osiągnięcie równowagi środowiskowej. Jednym ze sposobów jej osiągnięcia jest wdrożenie i przestrzeganie idei zrównoważonego rozwoju, która może być filarem odpowiedzialnego postępowania dla dobra obecnych i przyszłych pokoleń. Prekursorem tej fundamentalnej idei był profesor Walery Goetel, rektor AGH, człowiek wielu talentów, wybitny naukowiec i działacz społeczny. Jego dobrze znane powiedzenie: „co technika zepsuła, nauka musi naprawić”, stanowi nie tylko motto, lecz i wytyczną dla naukowców oraz decydentów dążących do przeciwdziałania negatywnemu wpływowi cywilizacji na środowisko.

W monografii przedstawiono szeroki wachlarz problemów związanych z inżynierią i ochroną środowiska, wpisujących się w kontekst idei zrównoważonego rozwoju.

Tematyka książki obejmuje m.in.:

- 1) problemy projektowania błękitno-zielonej infrastruktury na terenie Krakowa,
- 2) analizę dyspersji zanieczyszczeń powietrza wzdłuż ciągów komunikacyjnych na przykładzie Łodzi,
- 3) analizę poziomów zanieczyszczeń powietrza w pomieszczeniach dydaktycznych w budynkach po modernizacji,
- 4) analizę stanu i zmian zbiorników wodnych w Krakowie oraz okolicach w ciągu ostatnich dwudziestu lat,
- 5) znaczenie infrastruktury zielonej (roślinności wieloletniej i łąk kwietnych) w Krakowie na przykładzie parku Krakowskiego i parku Jordana,
- 6) funkcjonowanie baz infrastruktury oczyszczalni hydrofitowych,
- 7) rezultaty zakazu palenia węglem na przykładzie Krakowa,
- 8) analizę wpływu zanieczyszczeń powietrza na środowisko i zdrowie ludności,
- 9) analizę trendów zmian zanieczyszczeń powietrza w środowisku miejskim na podstawie wyników z monitoringu powietrza atmosferycznego.

We wszystkich przedstawionych w monografii prośrodowiskowych przedsięwzięciach wspólnym narzędziem wspomagającym jest wykorzystanie nowoczesnych technik. Jest to spójne z ideą zrównoważonego rozwoju, a także pionierskimi działaniami zainicjowanymi przez profesora Walerego Goetla związanymi z wykorzystaniem nauki i techniki do ochrony środowiska i zapewnienia równowagi ekologicznej.

Redaktor naukowy monografii
Marian Banaś

ADAPTACJA DO ZMIAN KLIMATU. PROJEKT I OCENA ELEMENTÓW BŁĘKITNO-ZIELONEJ INFRASTRUKTURY W WYBRANEJ LOKALIZACJI KRAKOWA

Monika Łągiewka¹, Tomasz Bergier¹

¹AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Katedra Kształtowania i Ochrony Środowiska, Kraków, Polska

e-mail: *lagiewka@agh.edu.pl*

Słowa kluczowe: błękitno-zielona infrastruktura, wody deszczowe, zrównoważona gospodarka wodna, adaptacja do zmian klimatu

Streszczenie: Rola terenów zieleni oraz wody na terenach zurbanizowanych w kontekście przyrodniczym, ale także rola, którą odgrywają w życiu mieszkańców, jest fundamentalna. Obszary zielone wraz z wodą stanowią aktywny filtr biologiczny, eliminują zjawisko miejskiej wyspy ciepła oraz przyczyniają się do powstania „miasta gąbki”, zachowując naturalny bilans wodny miasta i podnosząc jakość życia mieszkańców. W związku z tym ważne jest, by dążyć do tworzenia, ochrony i wspierania rozwiązań opartych na przyrodzie, czyli błękitno-zielonej infrastruktury (BZI), na terenach zurbanizowanych i poddanych presji zmian klimatycznych. Celem autorów niniejszego rozdziału jest wykazanie, że BZI może stanowić skuteczną formę zagospodarowania wód opadowych i rozwiązanie alternatywne wobec rozwiązań konwencjonalnych (tzw. szarej infrastruktury). Aby zrealizować ten cel, przeanalizowano i opisano wybraną lokalizację Krakowa pod kątem zagospodarowania terenu oraz hydrologicznym. W odniesieniu do wybranego obszaru studialnego zaproponowano rozwiązania BZI, a następnie opisano konkretne korzyści (usługi ekosystemowe) płynące z zastosowania tych rozwiązań. Szczególnie skupiono się na objętości retencyjnej oraz czasie zatrzymania deszczu. Przedyskutowano także wielofunkcyjność zaproponowanych rozwiązań pod względem ekologicznych, ekonomicznych i społecznych usług ekosystemowych.

1. Wprowadzenie

Na przestrzeni wielu lat tereny miejskie były radykalnie przekształcane dla dorywczych korzyści. Likwidowano tereny zieleni, regulowano rzeki, kanalizowano potoki i strumienie, a wody opadowe odprowadzano bezpośrednio do kanalizacji ogólnospławnych lub deszczowych. Takie zarządzanie terenami zurbanizowanymi przyczyniło się do poniesienia dotkliwych strat środowiskowych, gospodarczych i społecznych, a wciąż postępujący rozwój miast

generuje kolejne, złożone problemy środowiskowe [1, 2]. Na tereny zurbanizowane wpływa dynamika zmian klimatycznych, która prowadzi między innymi do zwiększonej częstotliwości i intensywności powodzi oraz susz. Problemy związane z wodami opadowymi, które się pojawiają na terenach miast, wynikają z poziomu detencji i retencji powierzchniowej oraz gruntowej, a także ze sposobu zagospodarowania wód na terenie miasta – zarówno w przestrzeni publicznej, jak i prywatnej [3]. Pokrycie terenów miejskich materiałami nieprzepuszczalnymi, a tym samym zmniejszenie powierzchni retencyjnej wód deszczowych, wpływa na pogorszenie jakości życia mieszkańców. Szybkie i gwałtowne odprowadzanie wody z obszarów miejskich przy wykorzystaniu tzw. szarej infrastruktury prowadzi do niekorzystnych zmian bilansu wodnego, co z kolei tworzy zagrożenia ekologiczne [1, 2].

Coraz więcej miast na świecie podejmuje działania mające na celu wprowadzanie w tkankę miejską praktyk zrównoważonego rozwoju, takich jak rozbudowa zielonej (ZI) i błękitno-zielonej infrastruktury (BZI), uzupełnianie konwencjonalnej infrastruktury rozwiązaniami opartymi na przyrodzie (*nature-based solutions*, NBS) czy też inwestowanie w nowoczesne ekologiczne technologie [1, 2, 4]. Zabiegi te mają na celu pomoc w łagodzeniu skutków i przystosowaniu miast do zmian klimatu, a także maksymalizację usług ekosystemowych [1, 5, 6]. W literaturze światowej opisano wiele przykładów, które potwierdzają, że tego typu działania przyczyniają się do zmniejszenia problemów, z którymi w obecnych czasach zmagają się miasta [1, 5].

Elementy BZI służą przede wszystkim zagospodarowaniu wód opadowych i regulacji obiegu wody na terenie zurbanizowanym. Rozwiązania te wykorzystują wiele zjawisk, które występują w naturalnym, niezmiennym środowisku przyrodniczym, takich jak filtracja, infiltracja, intercepcja czy ewapotranspiracja [7]. Dzięki swojej wielofunkcyjności zmniejszają zagrożenie powodziowe, zapobiegają skutkom suszy, a także umożliwiają wykorzystanie zgromadzonej wody do innych celów, takich jak np. nawadnianie obszarów zieleni miejskiej [8, 9]. Wody deszczowe wprowadzane do niecek bioretencyjnych, rowów chłonnych czy ogrodów deszczowych oprócz retencionowania zostają również podczyszczone na skutek procesów fitoremediacji, dzięki czemu trafiają do środowiska w znacznie lepszej jakości. Wprowadzanie na terenach zurbanizowanych tych rozwiązań pozwala na gospodarowanie wodą w sposób zrównoważony, a także lokalny. Pomaga to w walce z nieustającymi zmianami klimatycznymi [1, 8]. Obecnie dzięki rosnącej świadomości ekologicznej społeczeństwa wprowadzanie zrównoważonego zarządzania terenami zieleni oraz wodą na terenach miejskich jest łatwiejsze, choć wciąż nie jest prawnie uregulowane i nie jest obowiązującą normą. Istnieje wiele zapisów w lokalnych dokumentach, które zawierają zalecenia dotyczące zagospodarowania wód deszczowych w miejscu ich opadu, jednak wciąż nie są to wytyczne obligatoryjne [10, 11].

Błękitno-zielona infrastruktura na terenie Krakowa to parki i parki rzeczne, zbiorniki i oczka wodne, parki kieszonkowe, ale także zielone przystanki, zielone dachy, zielone ściany, ogrody deszczowe, niecki bioretencyjne czy suche poldery. Jednak wprowadzanych rozwiązań BZI jest wciąż niewiele, a duża część wód deszczowych trafia bezpośrednio do kanalizacji. Dlatego tak ważne jest rozwijanie na obszarze miasta infrastruktury, która pozwoliłaby na zatrzymanie wody w miejscu jej opadu, spowolniłaby jej spływ i zapobiegała przeciążeniu systemów kanalizacji. Celem niniejszego rozdziału jest pokazanie, że BZI może stanowić skuteczną formę zagospodarowania wód opadowych i wartościową alternatywną strategię wobec rozwiązań konwencjonalnych. Zaproponowane rozwiązania mają nie tylko wartość ekologiczną, ale także wpływają znacząco na jakość życia mieszkańców. Budują zdrowe środowisko życia oraz urozmaicają i ubogacają estetykę przestrzeni miejskiej [1, 8].

2. Metodologia

W celu zrealizowania założeń sformułowanych we wprowadzeniu wybrano obszar studialny – teren miejskiego targowiska „Tandeta” wraz z przylegającym do niego parkingiem. Następnie przeprowadzono analizę wyżej wymienionego obszaru studialnego na podstawie wizji terenowej oraz dostępnej ortofotomapy, mapy hydrologicznej Krakowa, a także istniejących dokumentów planistycznych Krakowa. Analizy przestrzenne wykonane zostały przy użyciu aplikacji SCALGO Live oraz oprogramowania QGIS wykorzystującego dane z Miejskiego Systemu Informacji Przestrzennej (MSIP) Krakowa. Za pomocą aplikacji SCALGO Live wyznaczono kierunki spływu wód opadowych na obszarze studialnym i zidentyfikowano miejsca akumulacji opadów. Aplikacja wykorzystuje dane z numerycznego modelu terenu udostępnianego przez Główny Urząd Geodezji i Kartografii (GUGiK). Przy zastosowaniu oprogramowania QGIS wykonano analizę przestrzenną stanu istniejącego, wyznaczono podzlewnie na obszarze studialnym, a następnie opracowano koncepcję zagospodarowania terenu, która opierała się na zaprojektowaniu rozwiązań błękitno-zielonej infrastruktury.

W celu określenia objętości odpływu wód opadowych z poszczególnych elementów podzlewni obliczono natężenie przepływu:

$$Q \text{ [dm}^3\text{/s]} = F \text{ [ha]} \cdot \psi \text{ [-]} \cdot q \text{ [dm}^3\text{/(s} \cdot \text{ha)]} \quad (1)$$

Do obliczeń wykorzystano powierzchnie poszczególnych elementów podzlewni (F), natężenie deszczu miarodajnego (q) według modelu krakowskiego w czasie 15 min i dla prawdopodobieństwa wystąpienia 10%, które wynosi 273,32 dm³/(s · ha) oraz współczynnik spływu powierzchniowego (ψ) odpowiadający poszczególnym elementom podzlewni.

Aby przedstawić realne korzyści płynące z wprowadzenia BZI na obszarze studialnym, obliczono objętość fizyczną poszczególnych urządzeń (V_f) jako iloczyn ich powierzchni i miąższości oraz ich objętość retencyjną (V_r) jako iloczyn objętości fizycznej i współczynnika porowatości przyjętego dla ogrodu deszczowego na poziomie 25%, dla pasaży bioretencyjnego – na poziomie 30% oraz dla niecki filtracyjnej – na poziomie 25% (w warstwie drenażowej). Obliczono również czas zatrzymania (czas retencji – t_r), czyli czas przepływu wody deszczowej przez zaprojektowane urządzenia BZI ($t_r = V_r/Q$), dla średniorocznej sumy opadów w Krakowie wynoszącej 673,6 mm.

3. Obszar studialny

Obszar studialny obejmuje teren miejskiego targowiska „Tandeta”, wraz z przylegającym do niego parkingiem, znajdującego się pomiędzy ulicami Krzywda i Powstańców Wielkopolskich a Stawem Płaszowskim. Jest to teren płaski, na którym rzędne wysokościowe kształtują się na poziomie od 202,05 m n.p.m. do 203,07 m n.p.m. Całkowita powierzchnia obszaru studialnego wynosi 15 944,54 m², z czego 14 161,54 m², czyli 89%, to teren uszczelniony powierzchni. Są to miejsca postojowe i droga dojazdowa do parkingu wykonane z kostki brukowej oraz dachy budynków. Tereny zielone (trawnik) zajmują powierzchnię 1783 m² (11%) (rys. 1). Zgodnie z zapisami miejscowego planu zagospodarowania

przestrzennego obszaru „Płaszowska–Krzywda” (MPZP) obszar studialny zajmuje tereny zabudowy usługowej – usługi komercyjne (U4), w przypadku których wskaźnik powierzchni biologicznie czynnej nie może być mniejszy niż 20%. Z przeprowadzonej analizy wynika, że wymagania zawarte w MPZP dotyczące powierzchni biologicznie nie zostały spełnione.



Rys. 1. Obecny stan zagospodarowania obszaru studialnego
(opracowanie własne na podstawie ortofotomapy zaktualizowanej w maju 2022 r.)

Obszar studialny znajduje się na działkach zestawionych i opisanych w tabeli 1. Są to tereny gminne, w większości oddane w dzierżawę lub inne formy władania pod miejskie targowisko „Tandeta”.

Tabela 1. Własność, powierzchnia oraz użyciek gruntowy nieruchomości obszaru studialnego

Nr działki	Powierzchnia [ha]	Własność	Inne formy władania	Użytek – opis, symbol
322/54 322/40	0,0589 0,0404	gmina miejska Kraków	zarządca terenu – Zarząd Dróg Miasta Krakowa	drogi, dr
322/64 322/33	0,1050 0,1521	gmina miejska Kraków	targowisko miejskie „Tandeta” – dzierżawca: Krakowskie Centrum Handlowo-Targowe Sp. z o.o.	inne tereny zabudowane, Bi
322/53	2,1089	gmina miejska Kraków	użytkowanie wieczyste – Przedsiębiorstwo Produkcji Handlu i Usług King-Skór s.c.	inne tereny zabudowane, Bi

Na terenie obszaru studialnego występuje sieć kanalizacji ogólnospławnej oraz kratki i odwodnienie liniowe odprowadzające wody deszczowe do studzienek kanalizacyjnych. Woda z dachów budynków centrum handlowego „Tandeta” również jest odprowadzana bezpośrednio do kanalizacji. Na rysunku 2 przedstawiono, zgodnie z danymi Miejskiego Systemu Informacji Przestrzennej, sieć kanalizacyjną znajdującą się na obszarze studialnym.



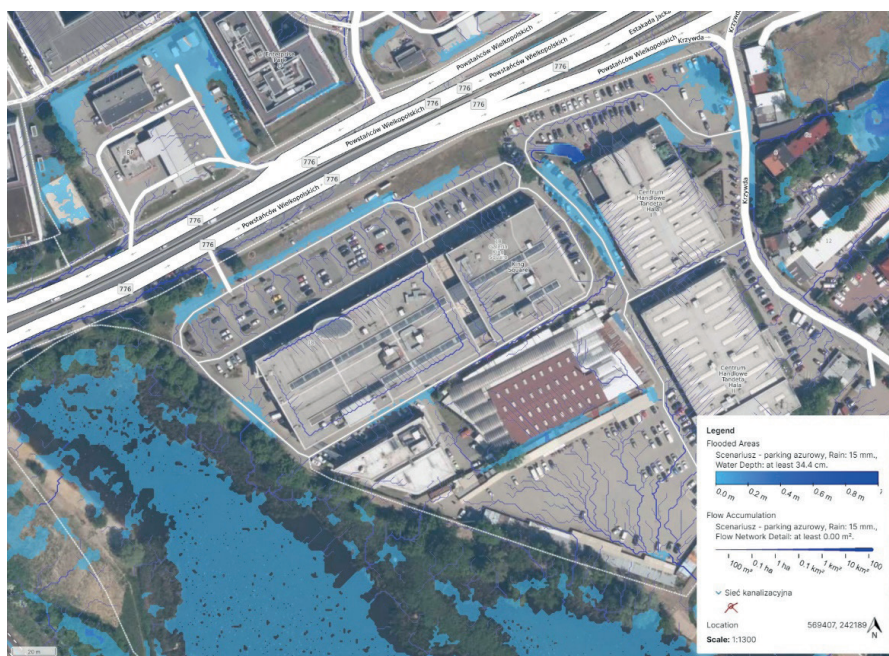
Rys. 2. Sieć wodno-kanalizacyjna na terenie obszaru badawczego

(opracowanie własne na podstawie https://msip.um.krakow.pl/kompozycje/?config=config_plan.json, MSIP 2023)

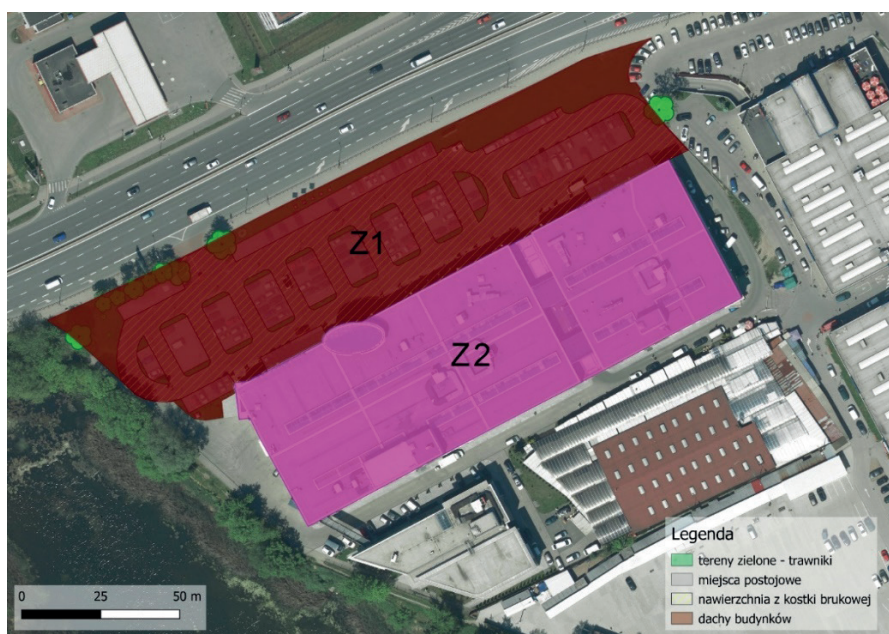
4. Analiza zlewni

W celu wyznaczenia podzlewni cząstkowych na obszarze studialnym przeprowadzono wizję terenową oraz wykonano symulację ścieżek spływu w aplikacji SCALGO Live. Aplikacja pozwoliła również na określenie miejsc akumulacji opadu. Analiza dotyczyła deszczu padającego przez 15 minut. Wynik symulacji przedstawiono na rysunku 3. W obrębie obszaru studialnego wyznaczono dwie podzlewnie cząstkowe (Z1 i Z2) przedstawione na rysunku 4. Podzlewnia Z1 obejmuje obszar drogi parkingowej, której nawierzchnia jest wykonana z kostki brukowej, wraz z miejscami postojowymi (również z kostki brukowej) oraz teren zielony – trawnik znajdujący się przy parkingu. Podzlewnię Z2 stanowią dachy budynku targowiska miejskiego „Tandeta”.

W obrębie wyżej wymienionej podzlewni wyznaczono cztery strefy (tab. 2), obliczono ich powierzchnię i określono odpowiadające im współczynniki spływu. Obliczono jednostkowe natężenia przepływu oraz objętości wód deszczowych w poszczególnych strefach (tab. 3). Wyniki tych obliczeń pozwoliły na odpowiedni dobór urządzeń błękitno-zielonej infrastruktury (podrozdz. 4.1).



Rys. 3. Symulacja wykonana przy użyciu aplikacji SCALGO Live obrazująca ścieżki spływu oraz miejsca akumulacji wód opadowych



Rys. 4. Podzlewnie cząstkowe wyznaczone na obszarze studialnym (opracowanie własne na podkładzie ortofotomapy zaktualizowanej w maju 2022 r.)

Tabela 2. Rodzaj nawierzchni oraz powierzchnia i współczynniki spływu poszczególnych stref obszaru studialnego

Rodzaj nawierzchni	Powierzchnia [m ²]	Współczynnik spływu
Podzlewnia 1 (Z1)		
Tereny zielone (trawnik)	1783	0,10
Miejsca postojowe (kostka brukowa)	2385	0,85
Droga parkingowa (kostka brukowa)	4051	0,85
Suma	8219	–
Podzlewnia 2 (Z2)		
Dachy budynków	7726	0,90
Suma Z1 i Z2	15 945	–

Tabela 3. Zestawienie wyników obliczeń natężenia przepływu i objętości wód deszczowych w odniesieniu do poszczególnych elementów podzlewni

Rodzaj nawierzchni	Natężenie przepływu [dm ³ /s]	Objętość wód deszczowych dla $t = 15$ min [m ³]
Podzlewnia 1 (Z1)		
Tereny zielone (trawnik)	5	4
Miejsca postojowe (kostka brukowa)	55	50
Droga parkingowa (kostka brukowa)	94	85
Podzlewnia 2 (Z2)		
Dachy budynków	190	171

4.1. Projekt BZI

Na podstawie przeanalizowanych danych obszaru studialnego, w szczególności powierzchni podzlewni oraz ilości wód deszczowych i natężenia ich spływu, opracowano koncepcję zagospodarowania wód deszczowych przy zastosowaniu rozwiązań błękitno-zielonej infrastruktury. Jej schemat przedstawiono na rysunku 5. W przypadku podzlewni Z1 zaprojektowano pasaż bioretencyjny (PB) oraz nieckę filtracyjną (NF), a w przypadku podzlewni Z2 – układ ogrodów deszczowych (OD).

Pasaż bioretencyjny umiejscowiono w pasie zieleni wzdłuż parkingu. Rozwiązanie to ma na celu zebranie i zatrzymanie wody, która obecnie odprowadzana jest do odwodnienia liniowego wzdłuż parkingu. W tym przypadku należy zaznaczyć, że konieczna jest zmiana profilu terenu (w obrębie miejsc postojowych znajdujących się przy urządzeniu) w celu skierowania wód deszczowych na teren pasażu. Powierzchnia retencyjna, chłonna w formie linearnej, z warstwą drenażową pozwoli na przechwycenie i infiltrację wód opadowych spływających z parkingu, a przy intensywnych opadach – na odprowadzenie nadmiaru wód do sytemu kanalizacji miejskiej. Warstwa drenażowa pasażu (wypełniona żwirem o frakcji 8–16 mm) będzie miała miąższość 30 cm, zaś warstwa wegetacyjna – 25 cm. W pasażu, ze względu na istniejącą infrastrukturę, zaprojektowano dwa przepusty, które pozwolą na połączenie ze sobą jego elementów i zachowanie ciągłości przepływu wody.



Rys. 5. Projektowany stan zagospodarowania obszaru studialnego
(opracowanie własne na podkładzie ortofotomapy zaktualizowanej w maju 2022 r.)

Nieckę filtracyjną zaprojektowano na terenie zielonym przyległym do zachodniej części parkingu, gdzie ze względu na ukształtowanie terenu zbiera się woda deszczowa już przy niewielkim natężeniu odpadów. Lokalizacja niecki pozwoli odebrać wodę z terenu utwardzonego. Na nieckę składa się strefa detencyjna o miąższości 30 cm, obsadzona roślinnością warstwa wegetacyjna o miąższości 20 cm oraz wypełniona żwirem o frakcji 8–16 mm warstwa filtracyjna o miąższości 20 cm. W warstwie filtracyjnej zaprojektowano rurę drenarską, która umożliwi odprowadzenie nadmiaru wody do istniejącej kanalizacji.

Ogrody deszczowe w pojemnikach, zaprojektowane na obszarze podzlewni Z2, zbierają wodę z dachu centrum handlowego. Struktura warstw ogrodu deszczowego przedstawia się następująco (od dołu pojemnika): warstwa I – żwir o frakcji 8–16 mm, 25 cm; warstwa II – piasek z domieszką żwiru w proporcji 4:1, 45 cm; warstwa III – warstwa wegetacyjna, ziemia żyzna z piaskiem w proporcji 1:3, 35 cm; warstwa IV – żwir ozdobny, 5 cm.

Każdy z zaprojektowanych obiektów zostanie obsadzony roślinnością hydrofitową, która znosi czasowe zalewanie, ale także okresy suche. Dodatkowo wody deszczowe będą podczyszczane przez korzenie i kłącza roślin. Wskazane jest zastosowanie rodzimych gatunków traw, bylin oraz roślin naturalnie występujących w strefach przybrzeżnych zbiorników wodnych i rzek. W razie konieczności należy dostosować gatunki nasadzeń odpowiednio do stref głębokościowych obiektu (strefy całkowicie zalewanej lub strefy wilgotnej).

4.2. Obliczenia ilości wód opadowych

Obliczenia parametrów wód deszczowych w odniesieniu do poszczególnych urządzeń przedstawiono w tabeli 4. W tabeli 5 podano ilość wody deszczowej, która spływa w czasie $t = 15$ min z danej podzlewni, w zestawieniu z sumaryczną pojemnością retencyjną zaprojekt-

towanych urządzeń obsługujących tę podzlewnię oraz z czasem zatrzymania wód deszczowych (obliczonym dla średniorocznej sumy opadów). Celem zestawienia powyższych danych jest ustalenie, czy urządzenia BZI zostały zaprojektowane prawidłowo oraz czy są w stanie przyjąć i okresowo zretencjonować wodę deszczową pochodzącą z obsługiwanej podzlewni.

Tabela 4. Parametry i wyniki obliczeń dotyczących zaprojektowanych urządzeń BZI na obszarze studialnym

Oznaczenie	Powierzchnia [m ²]	Objętość fizyczna V_f [m ³]	Objętość retencyjna V_r [m ³]
OD-1	58	64	16
OD-2	240	264	66
OD-3	106	117	29
OD-4	19	21	5
OD-5	108	119	30
OD-6	94	103	26
Suma	625	688	172
PB	430	237	71
NF	86	60	34
Suma			105

Tabela 5. Zestawienie objętości retencyjnej zaprojektowanych urządzeń BZI oraz objętości wód deszczowych spływających z poszczególnych podzlewni

Podzlewnia	Urządzenie BZI	Objętość retencyjna urządzenia V_r [m ³]	Objętość wód deszczowych spływających z podzlewni w czasie $t = 15$ min [m ³]	Czas zatrzymania [doba]
Z1	PB	71	139	10
	NF	34		
	Suma	105		
Z2	OD (OD-1÷OD-6)	172	171	13

Analizując wyniki obliczeń zestawione w tabeli 5, należy stwierdzić, że ogrody deszczowe zaprojektowane w obrębie podzlewni Z2 są w stanie przyjąć 100% opadu miarodajnego z tej podzlewni, zaś pasaży bioretencyjny i niecka filtracyjna zaprojektowane na obszarze podzlewni Z1 – 76%. Są to bardzo dobre wyniki, zapewniające skuteczną retencję wód deszczowych, zatrzymanie ich w krajobrazie, a co za tym idzie – istotne ograniczenie zrzutów do kanalizacji, co jest szczególnie cenne w przypadku kanalizacji ogólnospławnej, funkcjonującej na obszarze studialnym. Skuteczność hydrauliczną zaproponowanych rozwiązań potwierdza też średni czas zatrzymania wód deszczowych, obliczony dla średniorocznej sumy opadów 673,6 mm, który wynosi 13 dni. Tak więc zaproponowane rozwiązania, również poza okresami deszczy intensywnych (do jakich niewątpliwie należy deszcz miarodajny przyjęty do obliczeń zgodnie z modelem krakowskim), zapewnią skuteczną retencję wód deszczowych, zabezpieczając obszar również na wypadek suszy.

5. Podsumowanie

Zaproponowana koncepcja zagospodarowania wód deszczowych na obszarze studialnym zakładała zatrzymanie jak największej ilości opadu w miejscu jego wystąpienia, odciążenie kanalizacji oraz poprawę estetyki miejsca. W obrębie dwóch podzlewni (Z1 i Z2) zaprojektowano urządzenia BZI o łącznej powierzchni 1141 m² i o pojemności retencyjnej 277,23 m³. Z przeprowadzonych analiz i obliczeń wynika, że urządzenia (ogrody deszczowe) zaprojektowane na obszarze podzlewni Z2 są w stanie przyjąć 100% opadu miarodajnego ($p = 10\%$, $t = 15$ min), zaś urządzenia zaprojektowane w obrębie podzlewni Z1 (pasaż bioretencyjny i niecka filtracyjna) – 76%. Czas zatrzymania wód deszczowych obliczony dla średniorocznej sumy opadów 673,6 mm wynosi 13 dni.

Zastosowanie przedstawionych w niniejszym rozdziale rozwiązań niewątpliwie przyniesie korzyści ekologiczne, ale również ekonomiczne i społeczne. Zagospodarowanie wód opadowych dzięki zastosowaniu BZI wpłynie na rozwój bioróżnorodności i poprawę lokalnego mikroklimatu oraz odciąży miejską sieć kanalizacyjną, co doprowadzi do zmniejszenia prawdopodobieństwa wystąpienia lokalnych podtopień, które pojawiają się po długotrwałych i intensywnych opadach deszczu. Roślinność, która zostanie wprowadzona razem z rozwiązaniami BZI, wpłynie na jakość odprowadzanych do kanalizacji wód, a także poprawi estetykę otoczenia. Ponadto zastosowanie rozwiązań BZI w miejscu często odwiedzanym ze względu na jego handlową funkcję będzie miało walor edukacyjny oraz będzie budowało świadomość ekologiczną mieszkańców. Takie działania mogą też stać się inspiracją do wdrażania podobnych rozwiązań w innych obszarach Krakowa czy też na terenach prywatnych.

Dodatkowym aspektem, który należy tu poruszyć, jest kwestia Stawu Płaszowskiego, zbiornika o powierzchni 7,9 ha, powstałego w miejscu dawnego wyrobiska gliny i żwiru, które wykorzystywano na potrzeby rozbudowy węzła kolejowego w Płaszowie. Obecnie jest on zasilany wodami podziemnymi oraz wodami pochodzącymi ze spływu powierzchniowego. Warunki hydrogeologiczne Stawu Płaszowskiego kształtowane są przez stopień wodny Dąbie oraz system studni odwadniających tworzących „barierę odwadniającą miasto Kraków”. Duży wpływ na poziom lustra wody mają odwodnienia wykopów budowlanych tworzonych pod okoliczne inwestycje, a także zmniejszająca się ilość infiltrujących wód deszczowych do warstwy wodonośnej okolic stawu. Jest to spowodowane formą zabudowy pobliskiego terenu i odprowadzaniem wód opadowych oraz roztopowych do systemów kanalizacyjnych. Przeprowadzone badania pokazują, że w latach 1999–2018 objętość zasobów wodnych tego zbiornika obniżyła się o 16 329 m³ [12]. Ponadto badania przeprowadzone przez Biuro Badań i Ekspertyz „Green Vetiver” wykazały istotny wpływ obniżenia lustra wody Stawu Płaszowskiego na stan siedlisk i gatunków roślin oraz zwierząt bytujących w tym rejonie [13]. Mając powyższe na uwadze, należy stwierdzić, że zagospodarowanie wód deszczowych pochodzących z terenu centrum handlowego „Tandeta” mogłoby się przyczynić do zmniejszenia problemu niedoborów wody Stawu Płaszowskiego. Nadmiar wody, która po przefiltrowaniu przez złożę znajdujące się w pasażu bioretencyjnym i niecce filtracyjnej trafia do kanalizacji, przy zastosowaniu odpowiedniej infrastruktury mógłby być kierowany do zbiornika.

Bibliografia

- [1] Ghofrani Z., Sposito V., Faggian R., *A comprehensive review of blue-green infrastructure concepts*, International Journal of Environment and Sustainability, 2017, vol. 6(1), s. 15–36.
- [2] Januchta-Szostak A., *Błękitno-zielona infrastruktura jako narzędzie adaptacji miast do zmian klimatu i zagospodarowania wód opadowych*, Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, Architektura, Urbanistyka, Architektura Wnętrz, 2020, z. 3, s. 37–74, <https://doi.org/10.21008/j.2658-2619.2020.3.3>.
- [3] Gill S., Handley J., Ennos A., Pauleit S., *Adapting cities for climate change: the role of the green infrastructure*, Built Environment, 2007, vol. 33(1), s. 115–133, <https://doi.org/10.2148/benv.33.1.115>.
- [4] Krauze K., Żelewski Ł., Włodarczyk R., *Rola zieleni miejskiej w mieście przyszłości – Błękitno-Zielona Sieć Łodzi*, Acta Universitatis Lodzensis. Folia Biologica et Oecologica. Supplementum, 2010, s. 5–26.
- [5] Capotorti G., Alós Orti M.M., Copiz R., Fusaro L., Mollo B., Salvatori E., Zavattero L., *Biodiversity and ecosystem services in urban green infrastructure planning: A case study from the metropolitan area of Rome (Italy)*, Urban Forestry & Urban Greening, 2019, vol. 37, s. 87–96, <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.12.014>.
- [6] Demuzere M., Orru K., Heidrich O., Olazabal E., Geneletti D., Orru H., Bhawe A.G., Mittal N., Feliu E., Faehnle M., *Mitigating and adapting to climate change: Multi-functional and multi-scale assessment of green urban infrastructure*, Journal of Environmental Management, 2014, vol. 146, s. 107–115, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.07.025>.
- [7] Iwaszuk E., Rudik G., Duin L., Mederake L., Davis M., Naumann S., Wagner I., *Błękitno-zielona infrastruktura dla łagodzenia zmian klimatu w miastach: Katalog techniczny*, Ecologic Institute, Berlin; Fundacja Sendzimira, Kraków 2019.
- [8] Kasprzyk M., Szpakowski W., Poznańska E., Boogaard F.C., Bobkowska K., Gajewska M., *Technical solutions and benefits of introducing rain gardens – Gdańsk case study*, Science of The Total Environment, 2022, vol. 835, nr art. 155487, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155487>.
- [9] Mayr M., Alonso C., Rouse Ch., *Blue-green network planning as a spatial development and climate-resilient strategy – the case of Belmopan, Belize*, [w:] Caribbean Urban Forum 2017, 15th–19th May 2017, Belize City, Belize, s. 1–15.
- [10] *Kierunki rozwoju i zarządzania terenami zieleni w Krakowie na lata 2019–2030*, Urząd Miasta Krakowa, Wydział Kształtowania Środowiska, Kraków 2019.
- [11] *Załącznik nr 4 do Uchwały nr CXII/1700/14 Rady Miasta Krakowa z dnia 9 lipca 2014 r. „Studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego miasta Krakowa”*, Urząd Miasta Krakowa, Kraków 2014.
- [12] Gawalkiewicz R., *Zagrożenia zbiorników wodnych wynikające z działalności człowieka na przykładzie Stawu Płaszowskiego w Krakowie*, Przegląd Geologiczny, 2018, vol. 66(1), s. 38–47.
- [13] Wiehle D., Piątek G., Stanek Ł., Biuro Badań Naukowych i Ekspertyz „Green Vetiver”, *Inwentaryzacja przyrodnicza Stawu Płaszowskiego z uwzględnieniem wpływu obniżenia się lustra wody w Stawie Płaszowskim na stan siedlisk i gatunków roślin oraz zwierząt, a także wydanie wytycznych dla działań zmierzających do minimalizacji negatywnych skutków zmian dotyczących walorów przyrodniczych Stawu Płaszowskiego*, Kraków 2016.

ANALIZA PRZESTRZENNA DYSPERSJI ZANIECZYSZCZEŃ POWIETRZA WZDŁUŻ WYBRANEGO CIĄGU KOMUNIKACYJNEGO AGLOMERACJI MIEJSKIEJ

Maciej Dobrzański¹, Robert Cichowicz¹

¹Politechnika Łódzka, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, Łódź, Polska

e-mail: maciej.dobrzanski@p.lodz.pl; robert.cichowicz@p.lodz.pl

Słowa kluczowe: zanieczyszczenia powietrza, pomiary mobilne, symulacja komputerowa, analiza przestrzenna

Streszczenie: W rozdziale przedstawiono wyniki analizy przestrzennej dyspersji zanieczyszczeń powietrza wzdłuż wybranego ciągu komunikacyjnego w aglomeracji miejskiej (Łodzi). Analizę wykonano w dwóch wariantach, które ze sobą porównano. W pierwszym wykorzystano połowę mobilną aparaturę pomiarową do pozyskania rzeczywistych danych o chwilowych stężeniach zanieczyszczeń gazowych i pyłowych, które zaimplementowano przez interpolację przestrzenną do programu ArcGIS Pro. W drugim wariantcie wykonano symulację komputerową dyspersji zanieczyszczeń w programie OPA03 w przypadku emisji z emitora liniowego (pojazdu) oraz emitatorów punktowych (zabudowa miejska). W obu wariantach przyjęto ten sam obszar analizy, obejmujący wybrane ciągi komunikacyjne i ich otoczenie w centrum miasta (wzdłuż alei Politechniki i ulicy Żeromskiego) na kierunku północ–południe. Pomiary wykonywano na przełomie roku 2021 i 2022 na odcinku 1,5 km pomiędzy trzema skrzyżowaniami (od ulicy Wróblewskiego do skrzyżowania z ulicą Mickiewicza). Wykazano, że w skali lokalnej/miejskiej jedynie rzeczywiste pomiary pozwalają na lokalizację miejsc akumulacji zanieczyszczeń powietrza, a także określenie wpływu zabudowy na występowanie stref przewietrzania oraz wpływu lokalnego kierunku wiatru na jakość powietrza z danej strony ciągu komunikacyjnego. Należy podkreślić, że symulacje komputerowe stanowią bardzo ważne uzupełnienie pomiarów rzeczywistych, gdyż pozwalają przewidzieć stan jakości powietrza na podstawie natężenia ruchu kołowego na analizowanym odcinku. Najwyższe stężenia zanieczyszczeń odnotowano w obrębie skrzyżowań w miejscach tworzenia się korków drogowych, szczególnie w lokalizacjach osłoniętych przed przewietrzaniem, czyli z efektem tzw. kanionu ulicznego.

1. Wprowadzenie

Obserwowane zmiany klimatu wywoływane czynnikami naturalnymi oraz antropogenicznymi dotyczą między innymi zmian jakości powietrza zewnętrznego. Z uwagi na brak

możliwości wpływania na zjawiska naturalne, takie jak na przykład wybuchy wulkanów, ograniczać negatywne zmiany jakości powietrza można jedynie, ograniczając szkodliwe oddziaływanie czynników antropogenicznych. W 2015 roku wskaźnik urbanizacji Europy wynosił 72% [1], zatem przede wszystkim zwraca się uwagę na stan jakości powietrza na obszarach dużych aglomeracji miejskich, które w efekcie stają się głównymi lokalizacjami antropogenicznych źródeł zanieczyszczeń powietrza.

Do podstawowych zanieczyszczeń powietrza atmosferycznego należą między innymi: zanieczyszczenia pyłowe PM10 i PM2.5, związki azotu (NO , NO_2), związki węgla (CO , CO_2), dwutlenek siarki (SO_2) oraz węglowodory i ich pochodne. Spośród wymienionych zanieczyszczeń na podstawie raportu Europejskiej Agencji Środowiska (EEA) [2] za najczęściej analizowane można uznać PM10, PM2.5 oraz SO_2 czy NO_2 , które charakteryzują się stężeniami wyższymi, niż dopuszczają to zalecenia Unii Europejskiej (UE) i wytyczne Światowej Organizacji Zdrowia (WHO). Przy czym zgodnie z raportem EEA [2] z 2022 roku aż 71% populacji zamieszkującej aglomeracje miejskie jest narażone na stężenia PM10 powyżej dopuszczalnego średniorocznego poziomu $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ustalonego przez WHO w 2021 roku [3], a według norm UE wynoszących $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ – 11% populacji [4]. Natomiast w przypadku PM2.5 aż 96% populacji jest narażone na jego stężenia powyżej dopuszczalnego średniorocznego poziomu określonego przez WHO na $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Dopuszczalne średnie dobowe stężenie SO_2 wynosi odpowiednio $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$ i $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ w wytycznych EU i WHO, a dopuszczalne średnie godzinowe stężenie NO_2 wynosi $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ i $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ według wytycznych UE i WHO. Należy przy tym podkreślić, że – w odróżnieniu do Unii Europejskiej – WHO dokonała w 2021 roku aktualizacji dopuszczalnych poziomów zanieczyszczeń [3]. W przypadku PM10, PM2.5 i NO_2 zaostrożono dopuszczalne limity stężeń, obniżając ich wartość do $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ i $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Natomiast w przypadku SO_2 dopuszczalny poziom został zwiększony o 100% z $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ do $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (średnie dobowe stężenie SO_2).

Do podstawowych emitorów zanieczyszczeń zalicza się przemysł energetyczny [5], rolnictwo, indywidualne systemy grzewcze [6] oraz transport kołowy [7]. Z raportu EEA [2] wynika, że za emisję PM10 odpowiedzialni w największym stopniu (44%) są odbiorcy energii wtórnej (sektor mieszkaniowy, handlowy i instytucjonalny oraz gospodarstwa domowe), w 9% transport drogowy, a jedynie w 2% przemysł energetyczny. Biorąc pod uwagę zanieczyszczenie gazowe SO_2 , należy stwierdzić, że za jego emisję w największym stopniu (41%) odpowiedzialny jest przemysł energetyczny, w nieco mniejszym (37%) pozostały przemysł, a w 17% gospodarstwa domowe i branża usługowo-handlowa. W przypadku NO_2 dominującym źródłem emisji jest w 37% transport drogowy. Jak podkreśla Amirjamshidi ze współautorami [8], transport drogowy ma szczególnie wpływ na jakość powietrza na obszarach o wysokiej gęstości zaludnienia. Na tych obszarach generowane są dużo wyższe stężenia zanieczyszczeń z powodu powolnego ruchu pojazdów i dużej ich agregacji [9] przy małym stopniu przewietrzania terenu.

Obecnie wszelkie analizy stopnia zanieczyszczenia powietrza wykonywane są na podstawie danych ze stacjonarnych stacji monitoringu jakości powietrza. W Europie jest około 2551 stacji pomiarowych (dokonujących pomiaru PM10) rozlokowanych przede wszystkim na terenie aglomeracji miejskich [2]. W Łodzi znajdują się trzy stacje pomiarowe: jedna typu komunikacyjnego oraz dwie typu tła miejskiego. Taka liczba nie pozwala na prowadzenie szczegółowych pomiarów w skali lokalnej, uwzględniających indywidualne czynniki wpływające na jakość powietrza. Pomóc w tym mogą badania jakości powietrza prowadzone mobilnymi przyrządami pomiarowymi [10], które stają się coraz bardziej dostępne

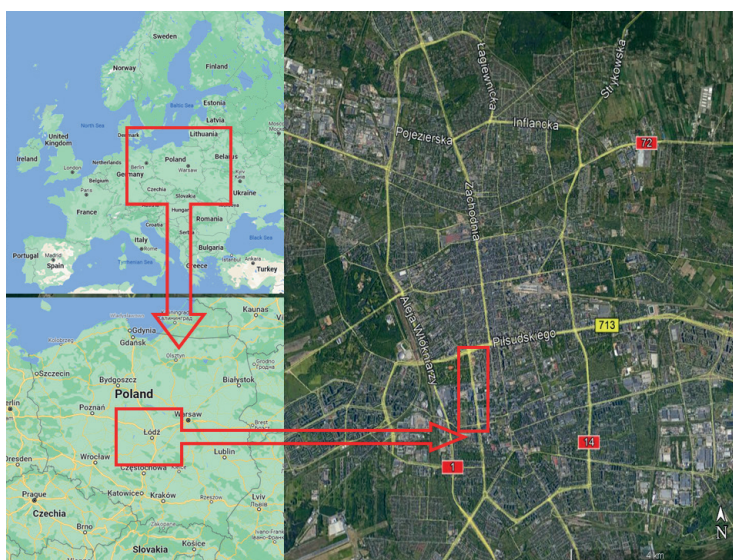
i powszechne. Przykładem tego typu rozwiązań może być wykorzystanie bezzałogowych statków powietrznych do transportu urządzeń pomiarowych [11, 12] lub niewielkich urządzeń stacjonarnych [13] czy przenośnych chromatografów gazowych. Inną metodą analiz szczegółowych mogą stanowić symulacje komputerowe dyspersji zanieczyszczeń przy użyciu programów numerycznych, takich jak na przykład Aero 2010, Emitter, OPA03 [14], AERMOD [15], ENVI-met czy Austal 2000 [16]. Analizy symulacyjne wymagają jednak określenia szczegółowo potencjalnych źródeł zanieczyszczeń oraz posiadania danych dotyczących wielkości emisji i jej rodzaju. Wszelkie błędy powodują, że uzyskane wyniki dotyczące jakości powietrza mogą się znacząco różnić od stanu faktycznego.

W związku z powyższym w niniejszym rozdziale podjęto się analizy źródeł antropogenicznych zanieczyszczeń powietrznych na wybranym obszarze ciągu komunikacyjnego na podstawie rzeczywistych pomiarów jakości powietrza oraz z wykorzystaniem obliczeń numerycznych.

2. Metodologia

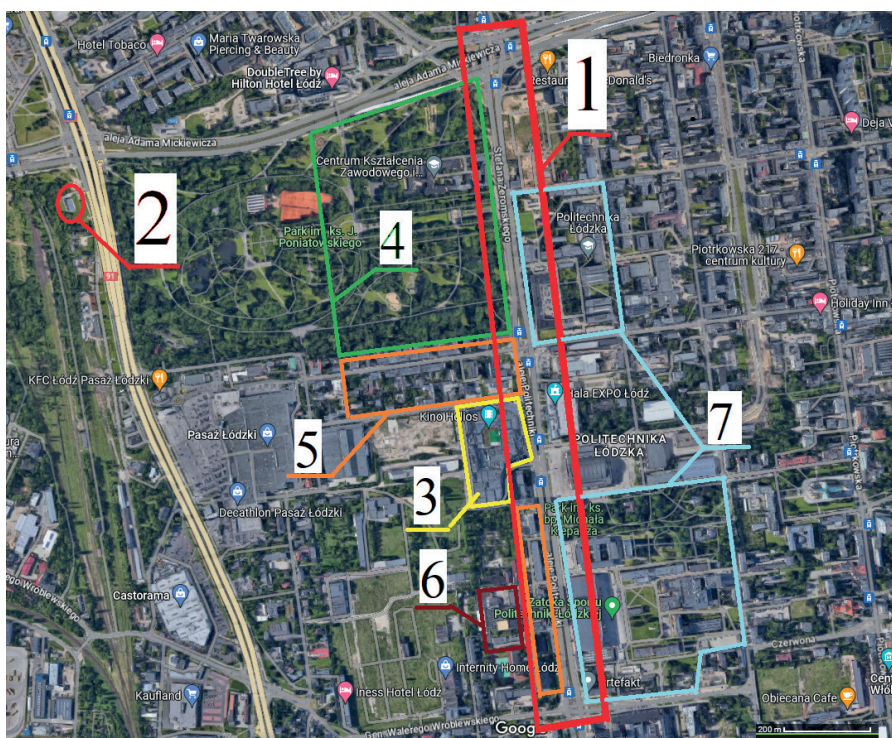
2.1. Analizowany obszar

Do analizy przyjęto obszar miejski wzdłuż arterii komunikacyjnej – alei Politechniki i ulicy Żeromskiego – przebiegającej z południa na północ na odcinku 1,5 km pomiędzy ulicą Wróblewskiego a aleją Mickiewicza (rys. 1) w Łodzi, która jest czwartą pod względem liczby mieszkańców (powierzchnia: 293,2 km², gęstość zaludnienia: 2245 os./km², liczba ludności: 658 444) jednostką osadniczą w Polsce.



Rys. 1. Lokalizacja obszaru analizy w Europie, Polsce i Łodzi
(opracowanie własne na podkładzie mapy z Google Maps)

Wybrany fragment ulicy (rys. 2 – oznaczenie nr 1) ma po dwa pasy ruchu w każdym kierunku, torowisko tramwajowe między pasami ruchu, chodniki i ścieżki rowerowe. Długość analizowanej ulicy to około 1,5 km, przebiega ona przez tereny o różnym stopniu zagospodarowania i przeznaczenia. W efekcie można wokół tego obszaru wyróżnić zarówno tereny usługowe (sklepy wielkopowierzchniowe – oznaczenie nr 3), jak i tereny zielone i parki (oznaczenie nr 4), tereny zabudowy wielorodzinnej (oznaczenie nr 5), tereny przemysłowe (oznaczenie nr 6) i teren kampusu uczelni wyższej (teren Politechniki Łódzkiej – oznaczenie nr 7). Wskaźnik intensywności zabudowy brutto wynosi w tym obszarze od 0,5 do 1,0. Analizowana ulica pełni ważną funkcję ciągu transportu kołowego, ponieważ stanowi trasę przejazdu komunikacji zbiorowej kołowej i szynowej, dojazdu do terenów uczelni wyższej, budynków mieszkaniowych i przemysłowych, a także ciągu tranzytowego przejazdu przez miasto. Według raportu [17] przeciętne natężenie ruchu na tym odcinku drogi w czasie 15 minut wynosi od 500 do 1000 pojazdów (od 2000 do 4000 pojazdów na godzinę). Ponadto w bliskim otoczeniu (około 100 m od obszaru analizy od strony południowo-zachodniej) znajduje się zakład przemysłowy zajmujący się nanoszeniem nadruku na tkaniny oraz ich farbowaniem. W celach produkcyjnych oraz grzewczych przedsiębiorstwo wykorzystuje kotły gazowo-olejowe o łącznej mocy 3,5 MW. Z charakterystyki zakładu wynika, że oprócz emisji będącej efektem spalania oleju w kotłach grzewczych emitowanymi zanieczyszczeniami gazowymi mogą być substancje pochodzące z procesów produkcyjnych: kwas octowy, kwas akrylowy oraz formaldehyd.



Rys. 2. Szczegółowa mapa obszaru analizy:

1 – obszar analizowany, 2 – stacja GIOŚ analizy jakości powietrza, 3–7 – objaśnienia w tekście (opracowanie własne na podkładzie mapy z Google Maps)

2.2. Metodyka analizy

Do analizy wykorzystano wyniki pomiarów rzeczywistych dyspersji zanieczyszczeń wzdłuż ciągu komunikacyjnego oraz numerycznych obliczeń dyspersji z wybranych źródeł zanieczyszczeń. Pomiary rzeczywiste były wykonywane w okresie od października 2021 do kwietnia 2022 roku (co w Europie Środkowo-Wschodniej stanowi zimowy okres grzewczy) z wykorzystaniem mobilnej aparatury pomiarowej. W szczegółowej analizie przestrzennej wykorzystano wartości uśrednione z serii pomiarowych dotyczących zanieczyszczeń pyłowych PM10 i PM2.5 oraz gazowych H_2S , SO_2 i NO_2 . Analizę numeryczną przeprowadzono, biorąc pod uwagę zanieczyszczenie pyłowe PM10 oraz zanieczyszczenia gazowe SO_2 i NO_2 . W skład aparatury pomiarowej wchodziły przyrządy pomiarowo-próbkujące zainstalowane na wysokości około 2 m nad terenem dzięki platformie transportowej (PT). Aparatura pomiarowa była wyposażona w następujące sensory: sensor laserowy do pomiaru PM10 i PM2.5 (dokładność 10 000 cząstek na sekundę), sensor elektrochemiczny do pomiaru H_2S (od 3 ppb do 1 ppm), SO_2 (0,5–2000 ppm) i NO_2 (od 3 ppb do 10 ppm). Do walidacji czujników pomiarowych wykorzystano chromatograf gazowy Z-Nose. Natomiast weryfikację otrzymywanych wyników PM10 i NO_2 przeprowadzono na podstawie danych pomiarowych ze stacji monitoringu jakości powietrza (rys. 2 – oznaczenie nr 2) Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska (GIOŚ), znajdującej się w odległości około 1 km od obszaru analizy. Stacja monitoringowa na alei Jana Pawła II to typ komunikacyjny dla obszaru miejskiego zgodnie z klasyfikacją EEA.

Numeryczne analizy dyspersji zanieczyszczeń przeprowadzono, wykorzystując program ArcGis Pro [18] do graficznego przedstawienia rzeczywistych danych pomiarowych oraz program OPA03 firmy Eko-Soft [19] do symulacji stężeń zanieczyszczeń z wybranych źródeł zanieczyszczeń. W interpolacji przestrzennej zastosowano metodę krigingu.

Symulacje w programie OPA03 wykonano dla ruchu kołowego oraz indywidualnych źródeł ciepła, opierając się na metodologii obliczeniowej opisanej w rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 26 stycznia 2010 roku w sprawie wartości odniesienia dla niektórych substancji [20]. Zgodnie z metodologią opisaną w literaturze [21] w przypadku ruchu kołowego przyjęto do analizy średnie natężenie ruchu, zmierzone w czasie pomiarów terenowych. Uwzględniono podział pojazdów na trzy typy: osobowe, ciężarowe i autobusy. W przypadku indywidualnych źródeł energii założono, że źródłem ciepła w 70% jest węgiel kamienny, a w 30% gaz ziemny. Na podstawie danych źródłowych [22] przyjęto godzinową emisję zanieczyszczeń względem źródła zasilania (tab. 1).

Tabela 1. Godzinowa emisja zanieczyszczeń z indywidualnych systemów grzewczych [22]

Źródło ciepła	Emisja [g/GJ]		
	PM10	SO_2	NO_2
Piec węglowy	427,0	560,0	170,0
Kocioł gazowy	0,3	0,4	60,0

W analizach numerycznych wykonanych za pomocą programu OPA03 nie uwzględniano tła zanieczyszczeń, w celu zobrazowania indywidualnego wpływu branych pod uwagę emitorów liniowych i punktowych na dyspersję zanieczyszczeń powietrza. Na potrzeby analizy dyspersji ze wszystkich źródeł emisji przyjęto jednakową wysokość – 2 m nad poziomem terenu.

Natomiast parametry meteorologiczne w czasie trwania pomiarów zmierzono za pomocą stacji meteorologicznej Davis Vantage Pro2.

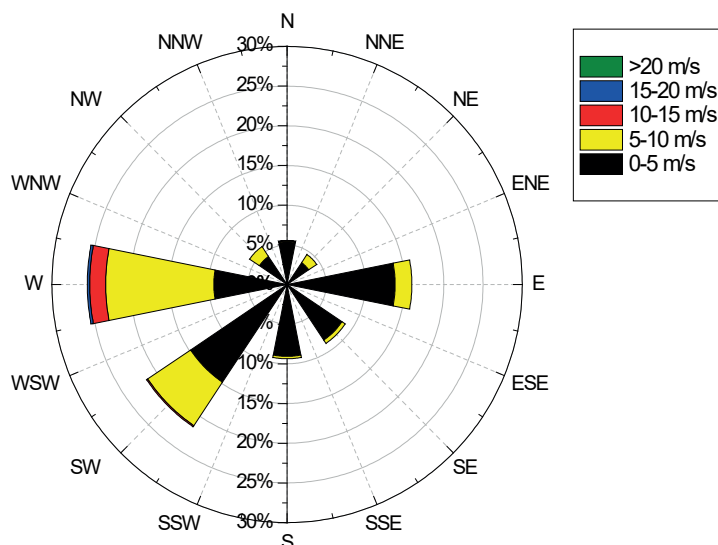
2.3. Warunki meteorologiczne

W tabeli 2 przedstawiono dane meteorologiczne z całego okresu zimowego 2021/2022 oraz dane zmierzone podczas pomiarów. Analizowany przedział czasowy – od października 2021 do marca 2022 – to w Polsce tak zwany okres grzewczy, ponieważ temperatury powietrza zewnętrznego są niższe od 10°C. Przy czym w czasie pomiarów zauważono, że jest to „statystycznie ciepły okres zimowy”, z temperaturami powietrza w przedziale 4,9–12,1°C. Jest to zgodne z danymi IMGW [23], według których przełom roku 2021/2022 klasyfikuje się jako „ekstremalnie ciepły”.

Tabela. 2. Dane meteorologiczne z okresu zimowego 2021/2022

Parametr	Jednostka	Okres zimowy 2021/2022			W czasie pomiarów		
		min.	śr.	maks.	min.	śr.	maks.
Temperatura powietrza	°C	−16,7	3,4	22,7	4,9	7,8	12,1
Wilgotność względna	%	12,0	80,0	100,0	52,0	60,0	80,0
Prędkość wiatru	m/s	0,0	3,7	17,0	0,6	1,5	2,2

W analizie dyspersji zanieczyszczeń istotnym parametrem wpływającym na ich rozprzestrzenianie się jest prędkość oraz kierunek wiatru. W Łodzi w okresie zimowym 2021/2022 przeważały wiatry z kierunku zachodniego (W) oraz południowo-zachodniego (SW) przy prędkości wiatru z zakresu 0–10 m/s (rys. 3).



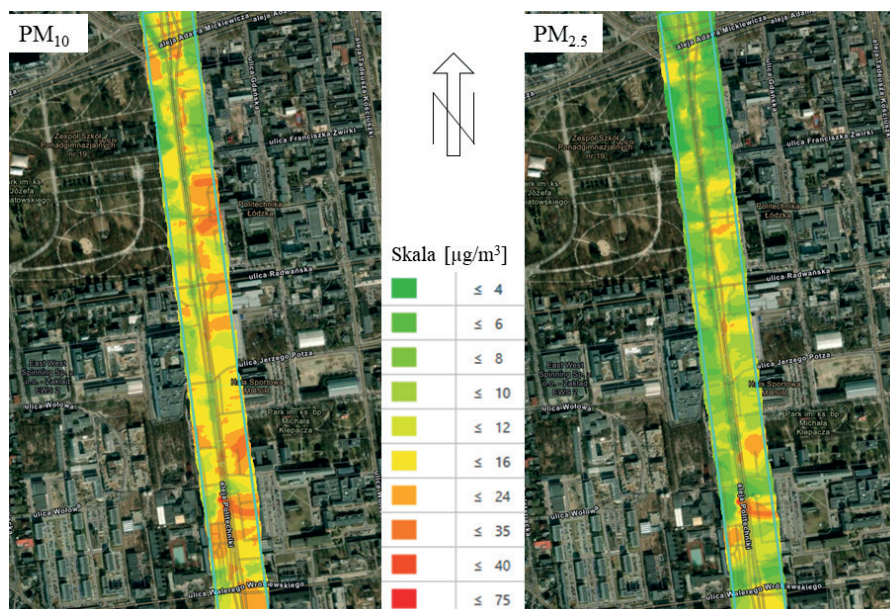
Rys. 3. Róża wiatrów w okresie zimowym 2021/2022
(opracowanie własne na podstawie danych źródłowych [23])

W okresie zimowym od października do marca średnia prędkość wiatru wynosiła 3,7 m/s, natomiast w czasie pomiarów – około 1,5 m/s.

3. Wyniki

3.1. Wyniki pomiarów terenowych

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów terenowych sporządzono za pomocą oprogramowania ArcGis Pro mapy dyspersji zanieczyszczeń na analizowanym terenie. Na rysunku 4 przedstawiono uśrednione wyniki dyspersji PM₁₀ i PM_{2.5} w okresie zimowym wraz z mapą otaczającego terenu.

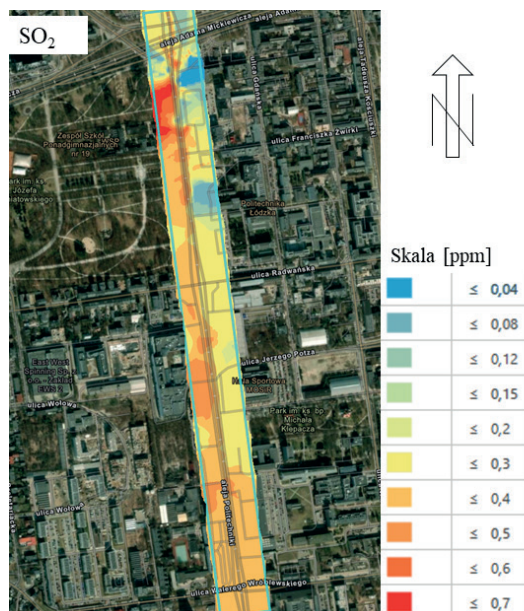


Rys. 4. Przestrzenny rozkład stężenia PM₁₀ i PM_{2.5} w okresie zimowym 2021/2022

Odnotowano średnie stężenie PM₁₀, na poziomie $13,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, oraz maksymalne wynoszące $76,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Zgodnie z przyjętym na terenie Polski indeksem jakości powietrza [24] średnie wyniki zaliczyć można do kategorii „dobrej” ($20,1\text{--}50,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Natomiast wartości maksymalne klasyfikują jakość powietrza jako „umiarkowaną” ($50,1\text{--}80,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$) i przekraczają dopuszczalny według standardów UE poziom $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Podwyższony poziom stężenia PM₁₀ dotyczył przede wszystkim ciągu komunikacyjnego po stronie zawietrznej względem kierunku wiatru z zachodu na wschód oraz w otoczeniu skrzyżowań. Aerodynamika powietrza w gęstej zabudowie miejskiej przyczyniła się do akumulacji zanieczyszczeń pyłowych w przestrzeniach między budynkami po wschodniej stronie ulicy, w które został ukierunkowany przepływ powietrza. Zbliżoną dyspersję przestrzenną można zaobserwować również w przypadku zanieczyszczenia PM_{2.5}. Mimo że stężenie PM_{2.5} w czasie pomiarów wynosiło średnio jedynie $9,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, to występowały obszary, w których wyniosło ono nawet $70,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Obszarami o podwyższonym stężeniu PM_{2.5} (oprócz tych opisanych w przypadku PM₁₀) były również tereny parkingów samochodowych. Stanowiły one otwartą przestrzeń, z której wiatr mógł łatwo unosić cząstki pyłowe.

Poza zanieczyszczeniami pyłowymi analizie poddano również wybrane zanieczyszczenia gazowe mogące pochodzić z transportu drogowego, przemysłu i indywidualnych źródeł ciepła.

Przestrzenna dyspersja stężenia SO_2 w okresie zimowym (rys. 5) wykazała zmiany w zakresie od 0,010 ppm do 0,638 ppm, czyli około 10–638 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Stężenia SO_2 powyżej 0,4 ppm stwierdzono po zachodniej stronie ulicy, szczególnie w obrębie budynków po ich zawietrznej stronie. Tłumaczyć to można z jednej strony występowaniem po stronie zachodniej budynków oraz zakładów przemysłowych wyposażonych w indywidualne źródła ciepła oraz, z drugiej strony, akumulacją zanieczyszczenia w zawirowaniach powietrza w przestrzeni za budynkami (względem kierunku wiatru). Najwyższe stężenie, 0,714 ppm, zmierzono w obrębie budynków Zespołu Szkół Ponadgimnazjalnych nr 19 znajdujących się w północno-zachodniej części obszaru analizy. Prawdopodobnie wynikało to z indywidualnego systemu grzewczego szkoły. Niestety nie uzyskano dokładnych danych na temat systemu zasilania szkoły w ciepło. Zgodnie z raportem UE w 17% za emisję SO_2 odpowiadają indywidualne systemy grzewcze [2]. Należy podkreślić, że tak wysokie stężenie stanowi znaczące przekroczenie dopuszczalnego poziomu 350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ według standardów UE [4]. Nie stwierdzono jednocześnie podwyższonego stężenia SO_2 w obszarze skrzyżowania z ulicą Radwańską, przy której po zachodniej stronie obszaru analizy znajduje się szereg budynków wielorodzinnych wyposażonych w indywidualne źródła ciepła. Przyczyną może być odległość ich posadowienia od obszaru analizy lub też stopień dyspersji zanieczyszczenia w powietrzu spowodowany kanionem ulicy i otwartą przestrzenią parku przylegającego do budynków.

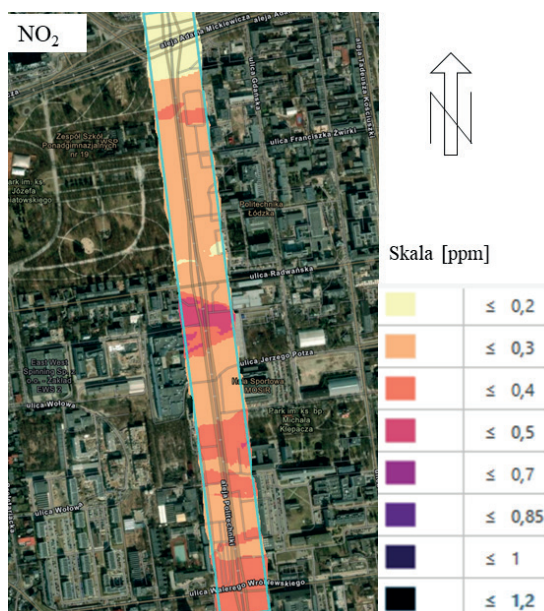


Rys. 5. Przestrzenny rozkład stężenia SO_2 w okresie zimowym 2021/2022

Po stronie wschodniej ciągu komunikacyjnego stężenie SO_2 było w większości niższe od 0,3 ppm, co mogło być spowodowane silniejszym przewietrzaniem, a tym samym rozrzedzaniem zanieczyszczenia w powietrzu [25].

Kolejnym przeanalizowanym zanieczyszczeniem gazowym był NO_2 , na którego stężenie wpływ ma przede wszystkim transport drogowy. Sporządzona dyspersja zanieczyszczenia (rys. 6) wykazała występowanie podwyższonego stężenia NO_2 , powyżej 0,4 ppm względem średniego z pomiarów, w obszarach skrzyżowań i wjazdów na parkingi. Jedynym stwierdzonym odstępstwem od zmierzonego zakresu stężeń NO_2 był obszar skrzyżowania ulicy Żeromskiego i alei Mickiewicza. Jest to skrzyżowanie dwupoziomowe, o otwartej przestrzeni, co mogło się przełożyć na lepsze przewietrzenie strefy wykonywania pomiarów na poziomie terenu.

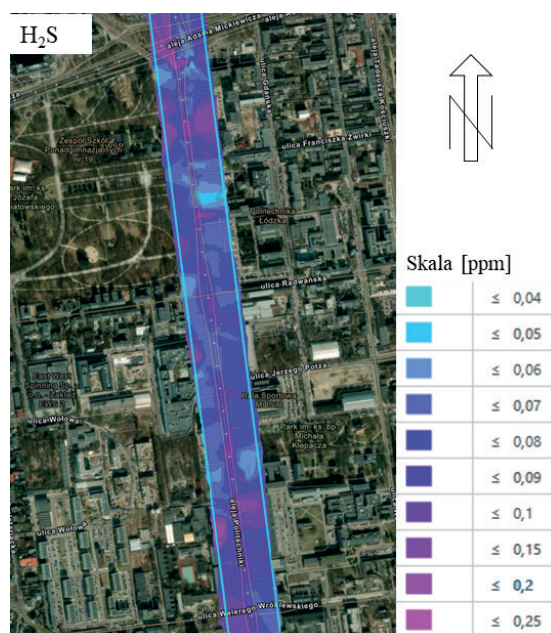
Ostatecznie stwierdzono, że w okresie zimowym średnie stężenie NO_2 przekraczało ponad dwukrotnie dopuszczalny limit określony w dyrektywie unijnej [4]. Wpływ na to miało duże natężenie ruchu pojazdów spalinowych oraz prawdopodobnie akumulacja zanieczyszczenia w tzw. kanionie ulicznym.



Rys. 6. Przestrzenny rozkład stężenia NO_2 w okresie zimowym 2021/2022

W pracy przedstawiono również wyniki analizy przestrzennej stężenia siarkowodoru (rys. 7). Mimo że zanieczyszczenie to nie ma bezpośredniego powiązania z systemami produkcji energii cieplnej lub transportem drogowym, to uzyskane wyniki dowodzą słuszności przeprowadzania pomiarów jakości powietrza z wykorzystaniem mobilnej aparatury pomiarowej.

Analizując rozmieszczenie obszarów o podwyższonym stężeniu H_2S , można zaobserwować, że było ono skorelowane z lokalizacją budynków, w szczególności ich stroną zawietrzną. Prawdopodobnie było to związane z pochodzeniem zanieczyszczenia z systemu wentylacyjnego instalacji kanalizacyjnej budynków, w których wylot znajduje się na dachu obiektu. Siarkowodor emitowany z niewielką prędkością na wysokości dachu budynku zostaje porwany przez wiatr i akumuluje się w przestrzeni za budynkiem (strona zawietrzna) względem kierunku wiatru. Tak szczegółowych obserwacji nie można byłoby wykonać za pomocą stacji monitoringu jakości powietrza znajdującej się kilka kilometrów dalej.



Rys. 7. Przestrzenny rozkład stężenia H_2S w okresie zimowym 2021/2022

W tabeli 3 przedstawiono szczegółowe dane dotyczące wyników pomiarów rzeczywistych w okresie zimowym 2021/2022.

Tabela 3. Zestawienie stężeń zanieczyszczeń zmierzonych w okresie zimowym 2021/2022

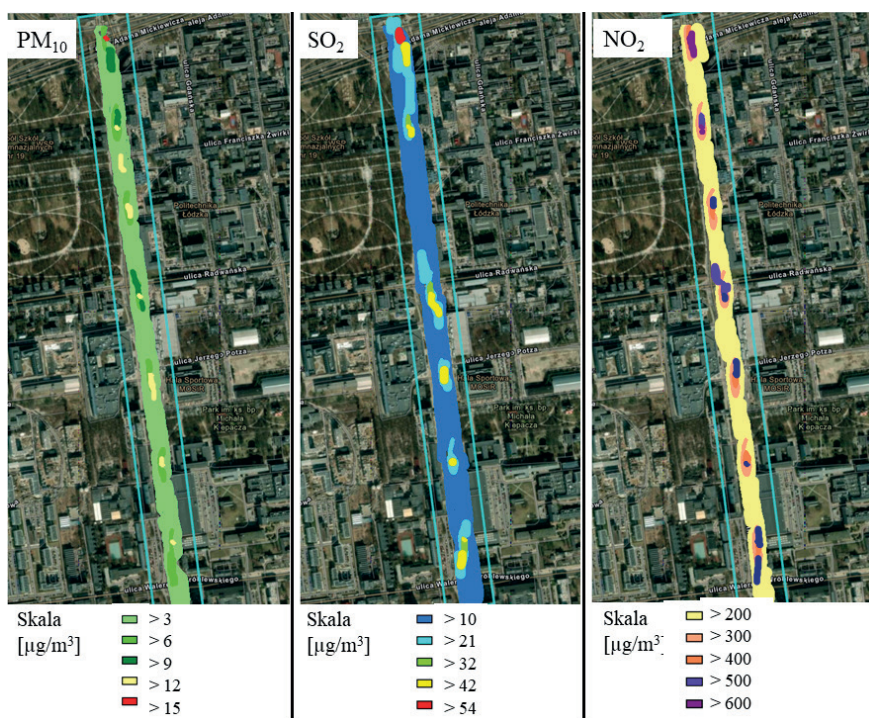
Parametr	Jednostka	5. percentyl	Średnia	95. percentyl	Maks.
PM10	$\mu g/m^3$	4,2	13,4	28,4	76,6
PM2.5	$\mu g/m^3$	2,2	9,1	17,9	70,3
H_2S	ppm	0,047	0,079	0,132	0,246
SO_2	ppm	0,010	0,275	0,638	0,714
NO_2	ppm	0,114	0,270	0,639	1,165
H_2S^*	mg/m^3	0,07	0,12	0,20	0,37
SO_2^*	mg/m^3	0,03	0,79	1,82	2,04
NO_2^*	mg/m^3	0,23	0,55	1,31	2,39

* Wartość przeliczona z ppm na mg/m^3 .

3.2. Wyniki analiz numerycznych

Kolejną część opisanych doświadczeń stanowi przeprowadzona przy użyciu oprogramowania numerycznego OPA03 symulacja obliczeniowa dyspersji zanieczyszczeń z wytypowanych, prawdopodobnych źródeł zanieczyszczeń na wybranym terenie.

Pierwszym źródłem zanieczyszczeń wziętym pod uwagę był ruch kołowy. Z przeprowadzonych badań natężenia ruchu w czasie pomiarów jakości powietrza wynika, że przez analizowany odcinek w okresie zimowym przejeżdżały średnio 653 pojazdy osobowe w ciągu godziny oraz średnio 11 pojazdów ciężarowych (powyżej 3,5 t). Przy czym analizowaną ulicą przemieszczały się głównie samochody osobowe, stanowiąc 98,4% ogólnej liczby pojazdów, następnie samochody ciężarowe stanowiące 1,6%, w tym komunikacja autobusowa stanowiąca 1%. W analizie nie uwzględniano taboru szynowego traktowanego jako transport „czysty” elektryczny. Założono średnią prędkość przejazdu pojazdów wynoszącą 30 km/h.



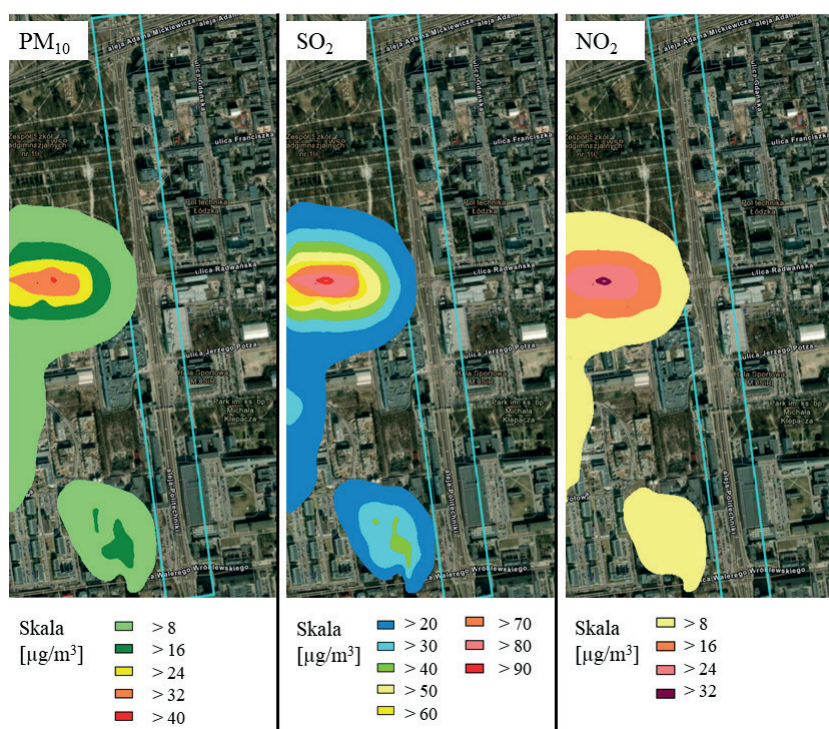
Rys. 8. Symulacja dyspersji maksymalnego, pochodzącego z ruchu kołowego, godzinowego stężenia PM₁₀, SO₂ i NO₂ w okresie zimowym

Uzyskane wyniki (rys. 8) potwierdzają niewielki wpływ transportu drogowego na emisję pyłów zawieszonych i SO₂ oraz wysoki wpływ na emisję NO₂. Wyznaczony przez symulację obszar objęty wpływem emisji z pojazdów obejmuje przede wszystkim pasy jezdni wraz z przyległymi ciągami pieszymi. Jest to związane z przyjętym w metodyce nieuwzględnieniem tła zanieczyszczeń. Biorąc pod uwagę szczegółową dyspersję, można zaobserwować, że program wygenerował wyższe stężenia zanieczyszczeń na obszarach skrzyżowań, w których założono większą akumulację pojazdów. Dowodzi to, że dane wejściowe symulacji mają ogromny wpływ na uzyskany wynik. Niestety wyniki modelowe nie oddają złożoności dyspersji poszczególnych zanieczyszczeń w terenie, którą możemy zaobserwować na podstawie rzeczywistych pomiarów.

Jednakże w przypadku zanieczyszczenia NO_2 związanego silnie z transportem kołowym można stwierdzić, że uzyskane w modelowaniu stężenia są zbliżone do tych rzeczywistych. Natomiast w przypadku PM_{10} i SO_2 modelowe stężenia są znacznie niższe niż zmierzone w rzeczywistości.

Drugim przeanalizowanym symulacyjnie prawdopodobnym źródłem zanieczyszczeń były indywidualne systemy grzewcze. W najbliższym otoczeniu analizowanego obszaru wzdłuż ulic Radwańskiej, Rembielińskiego i Wróblewskiego znajdują się głównie budynki wielorodzinne z indywidualnymi systemami grzewczymi. Symulacja komputerowa oparta na wprowadzonych danych wejściowych potwierdziła, że indywidualne źródła ogrzewania w znaczący sposób przyczyniają się do emisji pyłów zawieszonych i SO_2 .

Sporządzona mapa dyspersji zanieczyszczeń (rys. 9) wykazała, że zasięg oddziaływania emitorów o niewielkiej mocy nie obejmuje w znaczącym stopniu obszaru analizowanego ciągu komunikacyjnego. Emitowane zanieczyszczenia z analizowanych źródeł mogą jednak stanowić tło zanieczyszczenia na danym obszarze. Pokrywa się to z obserwacjami z pomiarów rzeczywistych, w których nie stwierdzono podwyższenia stężenia PM_{10} i SO_2 w rejonie analizowanych emitorów.



Rys. 9. Symulacja dyspersji stężenia PM_{10} , SO_2 i NO_2 pochodzącego z indywidualnych systemów grzewczych w okresie zimowym

Należy podkreślić, że w symulacji nie uwzględniono emitorów, którymi były zakład przemysłowy oraz szkoła (z powodu braku dostępu do danych). W ich pobliżu w pomiarach rzeczywistych stwierdzono podwyższone stężenie pyłów zawieszonych i SO_2 .

4. Podsumowanie

Przeprowadzone pomiary terenowe wykazały złożoność przemieszczania i akumulowania się zanieczyszczeń powietrza w przestrzeni miejskiej wzdłuż ciągu komunikacyjnego. Dowiedziono, że kierunek wiatru oraz struktura zabudowy mają silny wpływ na dyspersję zanieczyszczeń. W przypadku pyłów zawieszonych stwierdzono podwyższenie stężenia zanieczyszczeń w obszarze zawężonych przestrzeni pomiędzy budynkami oraz kanionów ulic odchodzących od obszaru analizy. Natomiast na stężenie zanieczyszczeń gazowych szczególnie wpływ miała lokalizacja potencjalnych źródeł. Wysokie stężenia SO_2 stwierdzono po zawiętrznej stronie budynków znajdujących się w otoczeniu występowania prawdopodobnych źródeł zanieczyszczenia. Pomiary potwierdziły, że ruch drogowy ma silny wpływ na emisję NO_2 , którego wysokie stężenia zmierzono w obszarze skrzyżowań i wjazdów na posesje i parkingi. Istotnym aspektem przeprowadzonych analiz było również porównanie danych z rzeczywistych pomiarów terenowych jakości powietrza z wynikami symulacji numerycznych. Symulacje komputerowe nie pozwoliły na uzyskanie tak szczegółowego obrazu dyspersji zanieczyszczeń jak w przypadku pomiarów rzeczywistych. Było to spowodowane brakiem możliwości uzyskania danych dotyczących wszystkich emitorów zanieczyszczeń, nieuwzględnieniem tła zanieczyszczeń na analizowanym terenie oraz niemożnością odwzorowania złożonej aerodynamiki przepływu powietrza. Dowodzi to, że obecnie symulacje mogą stanowić jedynie narzędzie pomocnicze i nie mogą zastąpić pomiarów rzeczywistych. Ponadto należy stwierdzić, że analiza jakości powietrza powinna się opierać w coraz większym stopniu na danych pozyskanych za pomocą mobilnej aparatury pomiarowej, uzupełniających dotychczasowy system monitoringu.

Bibliografia

- [1] *GHSL – Global Human Settlement Layer*, European Commission's Joint Research Centre (JRS), <https://ghsl.jrc.ec.europa.eu/> [dostęp: 12.07.2023].
- [2] *Air quality in Europe. Web Report*, European Environment Agency, 2022, <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2022> [dostęp: 12.07.2023].
- [3] *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*, World Health Organization, 2021, <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329> [dostęp: 12.07.2023].
- [4] *Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe*, OJ L 152, 11.06.2008, <http://data.europa.eu/eli/dir/2008/50/2015-09-18> [dostęp: 12.07.2023].
- [5] Lee H.D., Yoo W.J., Kang K.M., Kang S.J., Jung H.J., Oh J.K., *Evaluation of concentrations and source contribution of PM₁₀ and SO₂ emitted from industrial complexes in Ulsan, Korea: Interfacing of the WRF–CALPUFF modeling tools*, Atmospheric Pollution Research, 2014, vol. 5(4), s. 664–676, <https://doi.org/10.5094/APR.2014.076>.
- [6] Kaczmarczyk M., Sowizdżał A., Tomaszewska B., *Energetic and environmental aspects of individual heat generation for sustainable development at a local scale – A case study from Poland*, Energies, 2020, vol. 13(2), nr art. 454, <https://doi.org/10.3390/en13020454>.

- [7] Batterman S., Ganguly R., Isakov V., Burke J., Arunachalam S., Snyder M., Robins T., Lewis T., *Dispersion modeling of traffic-related air pollutant exposures and health effects among children with asthma in Detroit, Michigan*, Transportation Research Record, 2014, vol. 2452(1), s. 105–113, <https://doi.org/10.3141/2452-13>.
- [8] Amirjamshidi G., Mostafa T.S., Misra A., Roorda M.J., *Integrated model for microsimulating vehicle emissions, pollutant dispersion and population exposure*, Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2013, vol. 18, s. 16–24, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2012.08.003>.
- [9] Yao E., Song Y., *Study on eco-route planning algorithm and environmental impact assessment*, Journal of Intelligent Transportation Systems, 2013, vol. 17, s. 42–53, <https://doi.org/10.1080/15472450.2013.747822>.
- [10] Van den Bossche J., Peters J., Verwaeren J., Botteldooren D., Theunis J., De Baets B., *Mobile monitoring for mapping spatial variation in urban air quality: Development and validation of a methodology based on an extensive dataset*, Atmospheric Environment, 2015, vol. 105, s. 148–161, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.01.017>.
- [11] Cichowicz R., Dobrzański M., *3D spatial analysis of particulate matter (PM_{10} , $PM_{2.5}$ and $PM_{1.0}$) and gaseous pollutants (H_2S , SO_2 and VOC) in urban areas surrounding a large heat and power plant*, Energies, 2021, vol. 14(14), nr art. 4070, <https://doi.org/10.3390/en14144070>.
- [12] Jumaah H.J., Kalantar B., Halin A.A., Mansor S., Ueda N., Jumaah S.J., *Development of UAV-based $PM_{2.5}$ monitoring system*, Drones, 2021, vol. 5(3), nr art. 60, <https://doi.org/10.3390/drones5030060>.
- [13] Buček P., Maršolek P., Bílek J., *Low-cost sensors for air quality monitoring – the current state of the technology and a use overview*, Chemistry-Didactics-Ecology-Metrology, 2021, r. 26(1–2), s. 41–54, <https://doi.org/10.2478/cdem-2021-0003>.
- [14] Łatuszyńska M., Strulak-Wójcikiewicz R., *A model for assessing the environmental impact of transport*, Operations Research and Decisions, 2013, vol. 23(2), s. 67–80, <https://doi.org/10.5277/ord130206>.
- [15] Abu-Allaban M., Abu-Qudais H., *Impact assessment of ambient air quality by cement industry: A case study in Jordan*, Aerosol and Air Quality Research, 2011, vol. 11(7), s. 802–810, <https://doi.org/10.4209/aaqr.2011.07.0090>.
- [16] Atamaleki A., Zarandi M.S., Fakhri Y., Mehrizi A.E., Hesam G., Faramarzi M., Darbandi M., *Estimation of air pollutants emission (PM_{10} , CO, SO_2 and NO_x) during development of the industry using AUSTAL 2000 model: A new method for sustainable development*, MethodsX, 2019, vol. 6, s. 1581–1590, <https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.06.010>.
- [17] Kowalski M., Wiśniewski S., *Natężenie ruchu a zagospodarowanie Łodzi – zarys problematyki w świetle danych z Obszarowego Systemu Sterowania Ruchem*, Prace Komisji Geografii Komunikacji PTG, 2017, nr 20(4), s. 20–36, <https://doi.org/10.4467/2543859XP-KG.17.022.8028>.
- [18] ArcGis Online, Esri, <https://www.esri.com/pl-pl/arcgis/products/arcgis-pro/overview> [dostęp: 1.08.2022].
- [19] System OPA03, Eko-Soft, <http://www.eko-soft.com.pl/sysopa.htm> [dostęp: 1.08.2022].
- [20] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 26 stycznia 2010 r. w sprawie wartości odniesienia dla niektórych substancji w powietrzu, Dz.U. 2010 nr 16, poz. 87, <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=wdu20100160087> [dostęp: 1.08.2022].

-
- [21] Long P., Enjian Y., Yang Y., *Impact analysis of traffic-related air pollution based on real-time traffic and basic meteorological information*, Journal of Environmental Management, 2016, vol. 183(part 3), s. 510–520, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.09.010>.
- [22] Żeliński J., Matuszek K., Sobolewski A., Hrycko P., Telenga-Kopczyńska J., *Sprawozdanie z wykonania pracy pt. Wskaźniki emisji zanieczyszczeń powietrza emitowanych z indywidualnych źródeł ciepła: Raport*, Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla, Zabrze 2017, <https://czysteogrzewanie.pl/wp-content/uploads/2013/02/Wska%C5%BAniki-emisji-zanieczyszcze%C5%84-powietrza-emitowanych-z-indywidualnych-%C5%BAr%C3%B3de%C5%82-ciep%C5%82a-Raport.pdf> [dostęp: 2.05.2023].
- [23] Dane publiczne IMGW-PIB, <https://danepubliczne.imgw.pl/> [dostęp: 5.06.2023].
- [24] *Polski indeks jakości powietrza*, Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, <https://powietrze.gios.gov.pl/pjp/current> [dostęp: 2.06.2023].
- [25] Badach J., Voordeckers D., Nyka L., van Acker M., *A framework for air quality management zones – useful GIS-based tool for urban planning: Case studies in Antwerp and Gdańsk*, Building and Environment, 2020, vol. 174, nr art. 106743, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106743>.

POZIOM STĘŻEŃ ZANIECZYSZCZEŃ W POMIESZCZENIACH DYDAKTYCZNYCH UCZELNI WYŻSZEJ W BUDYNKU PO TERMOMODERNIZACJI

Tomasz Jerominko¹, Katarzyna Lisik¹, Robert Cichowicz¹

¹ Politechnika Łódzka, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, Łódź, Polska
e-mail: tomasz.jerominko@p.lodz.pl

Słowa kluczowe: stężenie ditlenku węgla, wentylacja budynków oświatowych

Streszczenie: Ze względu na rodzaj i efektywność działania systemów wentylacyjnych w pomieszczeniach dydaktycznych uczelni wyższych w zależności od ich przeznaczenia mogą występować podwyższone poziomy stężenie różnych zanieczyszczeń powietrza, w tym zanieczyszczeń mikrobiologicznych oraz gazowych. Z tego powodu przeprowadzono pilotażowe badania jakości powietrza (polegające na analizie poziomów stężeń dwutlenku węgla oraz zbadaniu stanu jakości powietrza od strony mikrobiologicznej) w dwóch jednakowych wybranych salach dydaktycznych Wydziału Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska Politechniki Łódzkiej. Sale znajdowały się na drugim piętrze budynku – jedna od strony północnej, druga od południowej. Do analizy wybrano pomieszczenia z wentylacją grawitacyjną. Stężenie CO₂ zmierzono przy użyciu czujnika LOOKO2 Extender (každorazowo umieszczając go na wysokości około 1,5 m od podłogi). Czas pomiaru stężenia CO₂ wynosił 45 minut. Próbkę mikrobiologiczną powietrza pobierane były metodą zderzeniową za pomocą próbnika powietrza Mas100-Eco. Pomiar prowadzono każdorazowo w czterech punktach pomiarowych w każdym z pomieszczeń. Dodatkowo pobierano wymazy mikrobiologiczne z powierzchni krat wentylacyjnych w celu ich analizy. Na podstawie wyników pilotażowych pomiarów można stwierdzić, że pod względem mikrobiologicznym powietrze w badanych salach dydaktycznych przed zajęciami było czyste i średnio czyste, natomiast w trakcie zajęć jakość powietrza gwałtownie się pogarszała. Oznacza to, że głównym źródłem zanieczyszczeń mikrobiologicznych jest człowiek, szczególnie gdy występująca w budynku wentylacja jest mało skuteczna. Dlatego należy podkreślić, że w przypadku termomodernizacji budynku powinno się także uwzględnić wymianę systemu wentylacji.

1. Wprowadzenie

Obecnie ludzie spędzają bardzo dużo czasu (nawet do 90% dnia) w pomieszczeniach zamkniętych/wewnętrznych, takich jak domy, budynki przemysłowe, usługowe i sportowe

oraz biura, czy też szkoły i przedszkola. W pomieszczeniach tych dopuszczalne stężenie różnych zanieczyszczeń powietrza (pyłowych, gazowych i mikrobiologicznych) może być podwyższone lub przekroczone. Jednym z ważniejszych jest dwutlenek węgla (CO_2) – bezzapachowy i bezbarwny gaz cieplarniany (przyczynia się do globalnego ocieplenia i znacząco wpływa na temperaturę powierzchni ziemi), powstający w procesie oddychania człowieka. Podwyższone stężenie CO_2 w pomieszczeniu (powyżej 1000 ppm) może powodować u ludzi senność, bóle i zawroty głowy oraz inne objawy niedotlenienia. W konsekwencji może wpływać na funkcje poznawcze i koncentrację. Przyjmuje się, że wartość stężenia CO_2 do 1000 ppm jest górną granicą „świeżego powietrza”. W efekcie wartości CO_2 powyżej tej granicy w pomieszczeniach zamkniętych świadczą o nieprawidłowo działającej wentylacji w danym obiekcie [1]. Użytkownicy takiego pomieszczenia często skarżą się na bóle głowy, dolegliwości nosa i gardła, zmęczenie, brak koncentracji oraz zmniejszenie sprawności umysłowej [2, 3] (tab. 1).

Tabela 1. Opis jakości powietrza w pomieszczeniach w zależności od stężenia dwutlenku węgla (opracowanie własne na podstawie [4])

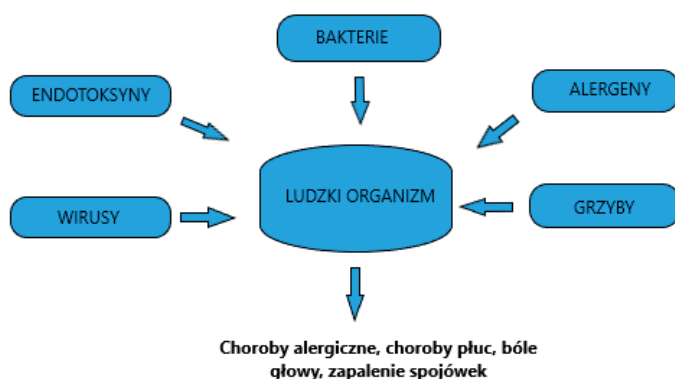
Stężenie CO_2 [ppm]	Jakość powietrza w pomieszczeniach zamkniętych
350–400	Powietrze czyste, dobre samopoczucie
<600	Dopuszczalne, niepowodujące pogorszenia samopoczucia stężenie CO_2 w pomieszczeniu
1000	Górna dopuszczalna granica stężenia CO_2 w pomieszczeniu
1500	Powietrze postrzegane jako duszne i nieświeże
2000	Mogą wystąpić objawy kaszlu, duszności, omdlenia
>10 000	Mogą wystąpić bóle głowy, wymioty, wzmożona częstość oddechów

Natomiast obecność w powietrzu bioareozoli tworzonych przez bakterie i ich endotoksyny oraz grzyby pleśniowe może niekorzystnie wpływać na samopoczucie i zdrowie ludzi. Mikroorganizmy obecne w powietrzu mogą przyczyniać się do powstawania między innymi takich schorzeń, jak: alergie, infekcje przeziębień, a także zatrucia. Szacuje się, że większość problemów zdrowotnych zależnych od jakości powietrza wewnętrznego wiąże się z narażeniem na grzyby – głównie pleśniowe. Stanowią one 70% całkowitej mikroflory powietrza w pomieszczeniach. Grzyby pleśniowe są przyczyną wielu groźnych chorób, takich jak: dermatozy skórne i głębokie, schorzenia układu oddechowego, mikotoksykozy oraz zatrucia związkami lotnymi wytwarzanymi przez grzyby. Mikroorganizmy te są czynnikiem alergizującym, mogącym wpływać na rozwój astmy, alergicznych nieżytów nosa, zapalenia spojówek i nieżytów przewodu pokarmowego [5].

Przykładowe czynniki biologiczne oddziałujące na zdrowie ludzkie przedstawiono na rysunku 1.

To, jakim powietrzem oddychamy, ma ogromne znaczenie, ponieważ stan jakości powietrza bezpośrednio wpływa na zdrowie i samopoczucie człowieka. Na jakość powietrza wewnętrznego oddziałuje również wiele innych czynników, na przykład powietrze zewnętrzne, które ma zdolność przenikania do wewnątrz przez nawiewniki, kanały wentylacyjne, okna i drzwi. Istotna jest również wielkość cząsteczek tworzących bioaerazol. Wielkość cząstek bioaerozolu to zazwyczaj od 0,1 μm do 100 μm [6]. W efekcie bioaerozole o mniejszych

cząstkach pozostają w powietrzu przez dłuższy czas, podczas gdy te o cząstkach większych osadzają się na powierzchniach. Badanie przeglądowe dotyczące bioaerozoli grzybowych pokazuje, że *Aspergillus*, *Penicillium*, *Stachybotrys*, *Cladosporium*, *Alternaria*, *Trichoderma* i drożdże są najczęstszymi rodzajami grzybów występującymi w powietrzu wewnętrznym i zewnętrznym, które mogą powodować poważne problemy zdrowotne [7, 8]. Jednak należy mieć na uwadze to, że powietrze w pomieszczeniach nigdy nie pozostaje wolne od mikroorganizmów, a nawet pomieszczenia czyste zawierają około 25 zarodników na metr sześcienny [9]. Stężenie bakterii w aerozolach może być mniejsze w powietrzu zewnętrznym niż w pomieszczeniach, ponieważ promieniowanie słoneczne wpływa negatywnie na wzrost mikroorganizmów znajdujących się w powietrzu [10]. Różny może też być rodzaj bakterii w aerozolach w powietrzu zewnętrznym i w pomieszczeniach.



Rys. 1. Przykładowe czynniki biologiczne wpływające na organizm ludzki

Na jakość powietrza wewnętrznego wpływa również liczba osób przebywających w pomieszczeniu oraz rodzaj wentylacji w budynku. Jeżeli powietrze wewnętrzne nie jest poddawane żadnym zabiegom, to może zawierać kurz, a nawet zarodniki pleśni, grzybów, bakterie i wirusy. Do najczęściej występujących grzybów w powietrzu wewnętrznym budynków biurowych należą gatunki z rodzaju *Penicillium*, *Cladosporium*, *Aspergillus*, *Ulocladium* i *Stachybotrys*. I jest to szczególnie niebezpieczne, ponieważ nie wszystkie budynki mają skuteczne systemy wentylacji mechanicznej czy też rekuperacji wyposażonej w filtry. Większość z nich, w szczególności te zaliczane do tzw. starego budownictwa, ma tylko wentylację grawitacyjną, w której wymiana powietrza w pomieszczeniach odbywa się na skutek jego naturalnego ruchu. Ponieważ jednak polskie akty prawne określają minimalną ilość dopływającego świeżego powietrza na jedną osobę na 20 m³/h [11, 12], to w przypadku wentylacji grawitacyjnej spełnienie tego wymogu może okazać się trudne lub wręcz niemożliwe. Dodatkowo należy pamiętać, że często obecnie przeprowadzona termomodernizacja istniejących obiektów (np. edukacyjnych) w znacznej większości przypadków sprowadza się jedynie do docieplenia przegród i wymiany okien [13], natomiast wentylacja w tego typu obiektach najczęściej pozostaje niezmienną. W efekcie przeprowadzone zabiegi termomodernizacyjne przyczyniają się jedynie do zmniejszenia kosztów użytkowania obiektu związanych z ogrzewaniem, a nie do poprawy jakości powietrza w pomieszczeniach. Dlatego z powodu zagrożeń związanych z obecnością szkodliwych czynników biologicznych

w pomieszczeniach konieczna jest regularna kontrola poziomu zanieczyszczenia mikrobiologicznego powietrza wewnątrz pomieszczeń, której uzyskane wyniki powinny być odniesione do zalecanych norm czystości mikrobiologicznej powietrza (tab. 2).

Tabela 2. Zalecenia normy mikrobiologicznej czystości powietrza
(opracowanie własne na podstawie [14, 15])

Rodzaj drobnoustrojów	Czyste powietrze	Średnio czyste powietrze	Mocno zanieczyszczone powietrze
	cfu/m ³ *		
Bakterie	<1000	1000–3000	>3000
Promieniowce	<10	10–100	>100
Gronkowce hemolizujące	0	1–25	>25
Gronkowce mannitolu-dodatnie	0	<50	>50
Bakterie <i>Pseudomonas fluorescens</i>	0	1–50	>50
Grzyby	3000–5000	5000–10 000	>10 000

* cfu/m³ – liczba kolonii na metr sześcienny powietrza.

2. Materiał i metody

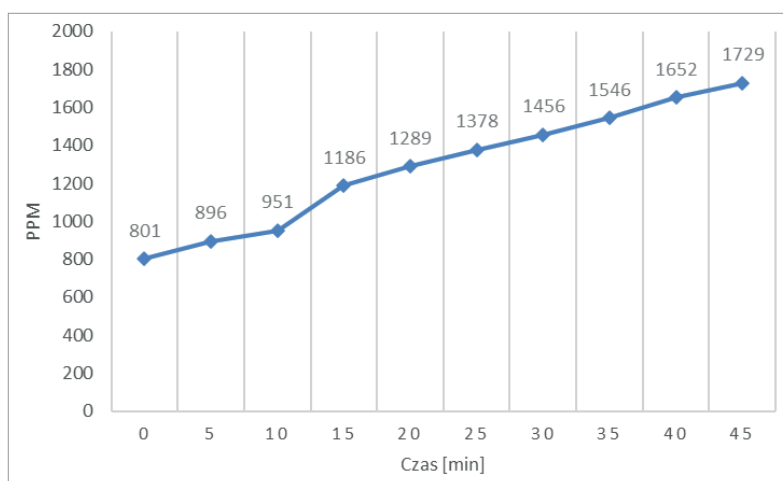
Z powodów, które opisano we wstępie, postanowiono wykonać pomiary pilotażowe jakości powietrza w dwóch salach dydaktycznych Wydziału Budownictwa Architektury i Inżynierii Środowiska Politechniki Łódzkiej. Wybrane pomieszczenia znajdują się w budynku, który został poddany termomodernizacji (docieplenie ścian i stropodachu, wymiana okien około 10 lat temu). Wymiary każdej sali wynosiły 600 cm × 639 cm, a wysokość 310 cm. Kubatura każdej sali wynosiła 118,8 m³. Obydwie sale znajdują się na drugim piętrze budynku. Jedno z pomieszczeń znajduje się od strony północnej, drugie od strony południowej. W salach występuje wentylacja grawitacyjna, nawiew odbywa się przez dwa nawietrzaki okienne, wywiew – przez kratki wentylacyjne umieszczone pod stropem pomieszczenia. Podczas analiz temperatura na zewnątrz pomieszczeń wynosiła około 16–18°C, a w salach 22–24°C. Pomiar stężenia CO₂ wykonano na wysokości około 1,5 m od podłogi przy użyciu czujnika LOOKO2 Extender. Czas pomiaru wynosił w obydwu salach każdorazowo po 45 minut. Próbkę mikrobiologiczną powietrza pobierane były metodą zderzeniową za pomocą próbnika powietrza Mas100-Eco. Pobór powietrza odbywał się 15 minut przed zajęciami oraz w trakcie trwania zajęć (20 minut po ich rozpoczęciu). Liczba osób obecnych podczas pomiarów wynosiła 14 w sali położonej po stronie południowej budynku oraz 16 osób w sali położonej po stronie północnej. Pomiar przeprowadzono w czterech punktach pomiarowych w każdej z sal. Punkt 1 znajdował się przy drzwiach, punkt 2 pośrodku sali, punkt 3 przy oknie oraz punkt 4 bezpośrednio przy kratce wentylacyjnej. Dodatkowo z powierzchni kratki wentylacyjnych pobrano wymaz mikrobiologiczny w celu analizy mikrobiologicznej. W każdym z punktów pomiarowych pobrano powietrze o natężeniu przepływu 100 l/min

na płytce Petriego zawierające specjalne podłoża mikrobiologiczne odpowiednie dla każdej z grup mikroorganizmów. W przypadku grzybów było to podłoże Sabourauda, w przypadku bakterii agar odżywczy, a w przypadku gronkowców mannitolo-ujemnych i mannitolo-dodatnich pożywka Chapmana. Następnie płytki inkubowano w temperaturze 37°C przez 48 godzin w celu uzyskania kolonii bakterii oraz przez 72 godziny w temperaturze 22°C, w celu uzyskania kolonii grzybowych. Następnie zliczono wyrosłe kolonie i z uwzględnieniem poprawki Feller'a przeliczono na liczbę komórek tworzących kolonię w metrze sześciennym powietrza [jtk/m³].

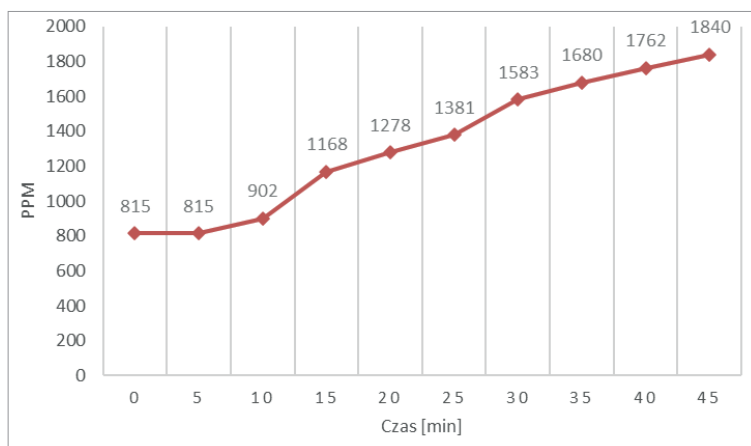
3. Wyniki i wnioski

Uśrednione dla miesiąca czerwca wyniki pomiarów stężen CO₂ w salach przedstawiono na rysunkach 2 i 3. Pomierzona wartość CO₂ na zewnątrz budynku wynosiła około 600–640 ppm.

W obydwu pomieszczeniach wartości stężen CO₂ w trakcie zajęć dydaktycznych były w zakresie od około 800 ppm w momencie wejścia studentów do pomieszczenia i rozpoczęcia zajęć do około 1800 ppm po 45 minutach prowadzenia zajęć. Warto zauważyć, że akceptowalna wartość stężenia CO₂ wynosząca do 1000 ppm została przekroczona już po około 15 minutach prowadzenia zajęć dydaktycznych. Uzyskane wartości stężen dwutlenku węgla, około 1800 ppm, wskazują na potrzebę intensyfikacji działań mających na celu poprawę wentylacji, np. zwiększenia strumienia świeżego powietrza. Niemniej jednak należy pamiętać, że takie zalecenie (względem systemu wentylacji grawitacyjnej, który znajdował się w obydwu salach) bardzo często może okazać się niemożliwe do wykonania, zwłaszcza w okresach letnich, kiedy różnica temperatur pomiędzy powietrzem wewnętrznym i zewnętrznym jest niewielka. Dlatego w istniejących obiektach edukacyjnych wraz z termomodernizacją powinien być wymieniony system wentylacji na wentylację mechaniczną.

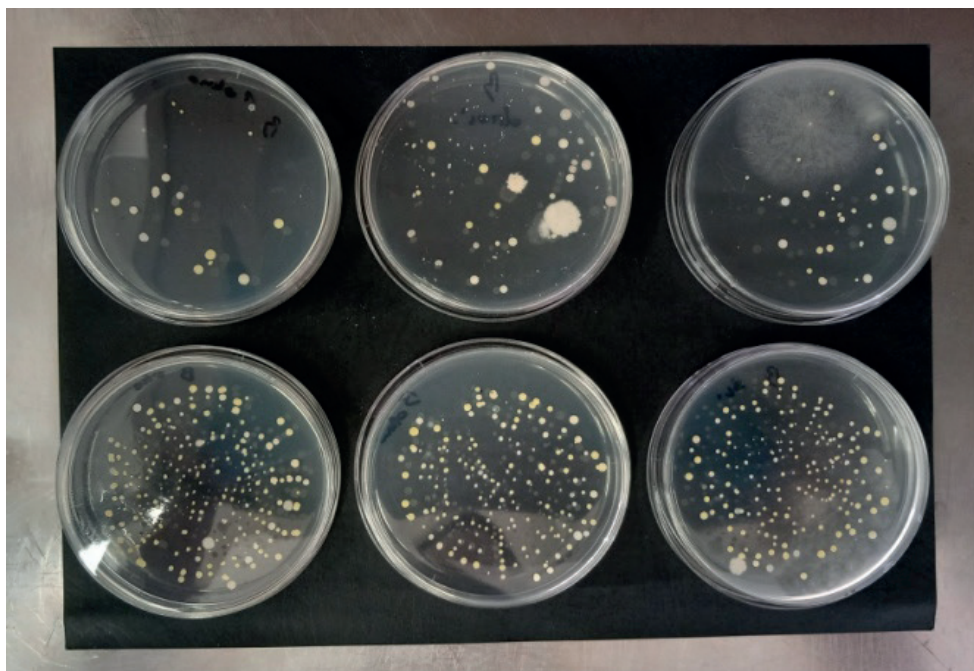


Rys. 2. Stężenie CO₂ w trakcie zajęć lekcyjnych w sali dydaktycznej po stronie południowej budynku (wartości średnie z czerwca)

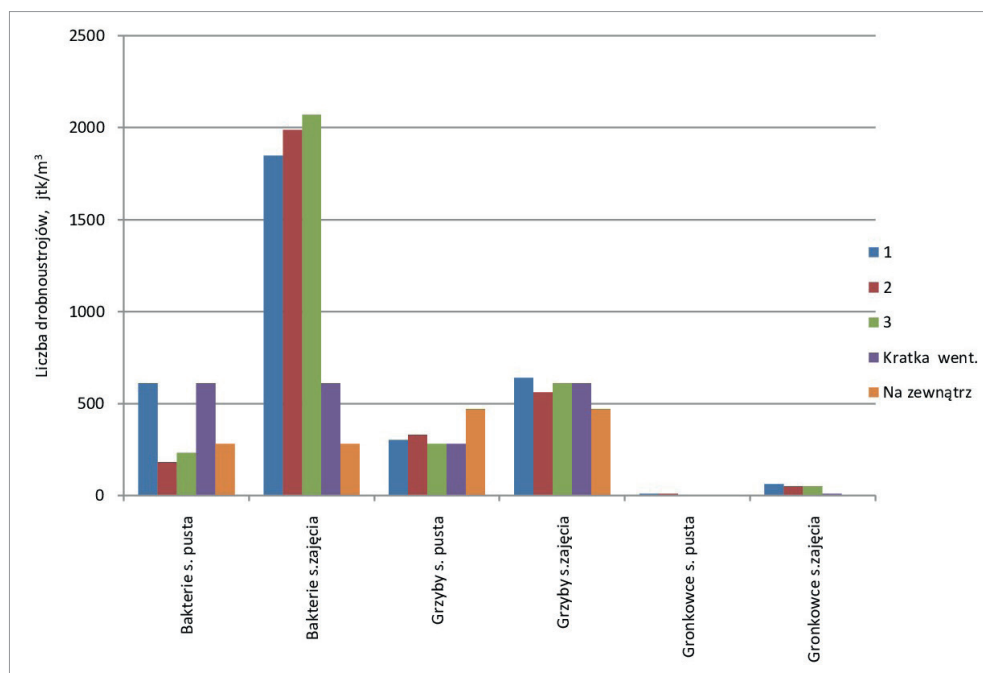


Rys. 3. Stężenie CO₂ w trakcie zajęć lekcyjnych w sali dydaktycznej po stronie północnej budynku (wartości średnie z czerwca)

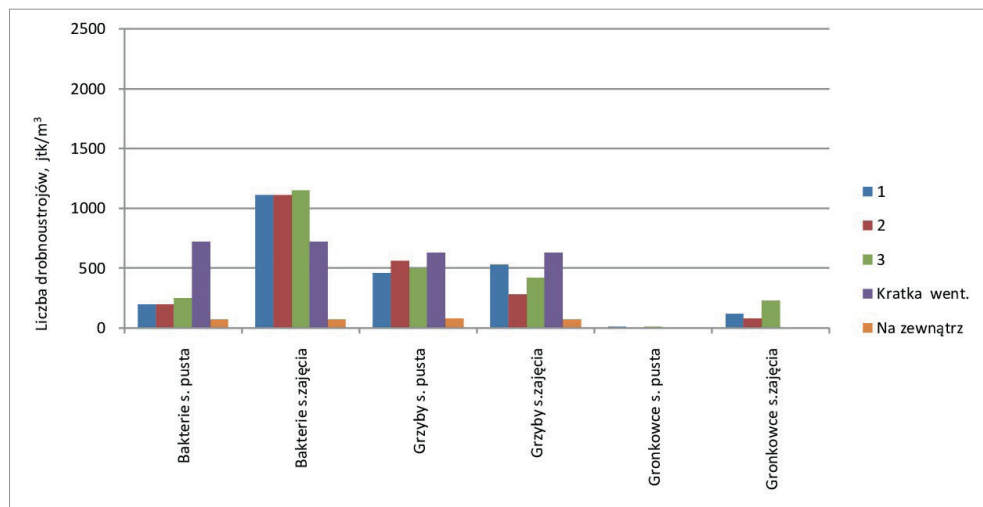
Na rysunkach 4–7 przedstawiono przykładowe zdjęcia kolonii bakterii oraz wyniki analiz mikrobiologicznych.



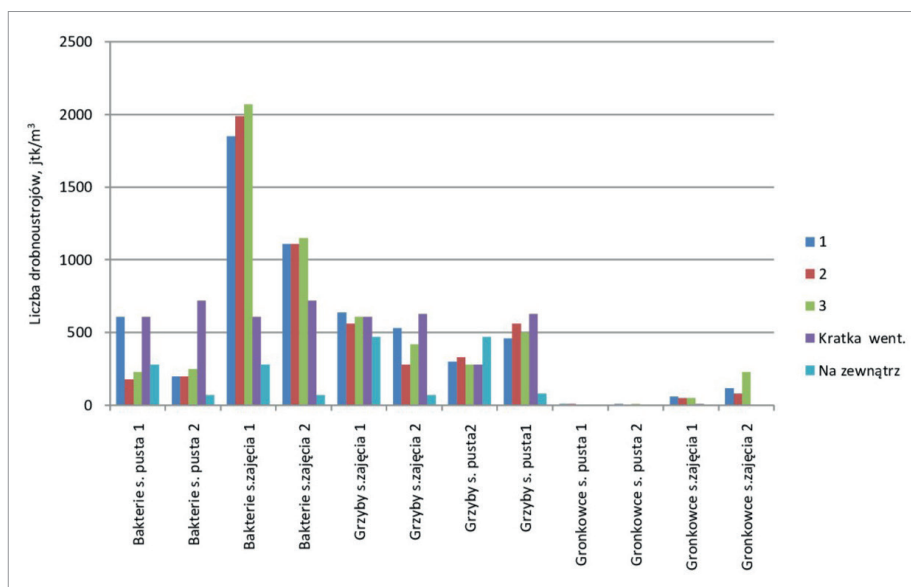
Rys. 4. Przykładowe kolonie bakteryjne przed zajęciami (płytki na górze) i w trakcie zajęć (płytki na dole)



Rys. 5. Liczba drobnoustrojów w sali dydaktycznej po stronie południowej budynku przed zajęciami dydaktycznymi i w ich trakcie w punktach pomiarowych 1, 2, 3, przy kratce wentylacyjnej oraz na zewnątrz budynku (wartości średnie z czerwca)



Rys. 6. Liczba drobnoustrojów w sali dydaktycznej po stronie północnej budynku przed zajęciami dydaktycznymi i w ich trakcie w punktach pomiarowych 1, 2, 3, przy kratce wentylacyjnej oraz na zewnątrz budynku (wartości średnie z czerwca)



Rys. 7. Porównanie liczby drobnoustrojów w obydwu badanych salach dydaktycznych przed zajęciami dydaktycznymi i w ich trakcie w punktach pomiarowych 1, 2, 3, przy kratce wentylacyjnej oraz na zewnątrz budynku (wartości średnie z czerwca); sala 1 – południe, sala 2 – północ

Analizując powyższe wykresy dotyczące mikrobiologicznego zanieczyszczenia powietrza wewnątrz badanych pomieszczeń dydaktycznych, zaobserwować można, że ogólna liczba bakterii tworzących kolonie bakteryjne jest wyższa w sali dydaktycznej położonej od strony południowej budynku głównie podczas zajęć dydaktycznych, w obecności ludzi. Liczba ta wynosi od 1850 jtk/m³ w punkcie pomiarowym 1 (drzwi wejściowe) do 2070 jtk/m³ w punkcie 3 (w pobliżu okna). W sali dydaktycznej położonej po stronie północnej ogólna liczba bakterii wynosi od 1110 jtk/m³ do 1150 jtk/m³. Również liczba grzybów jest wyższa w sali po stronie południowej – zarówno przed zajęciami, jak i w ich trakcie – wynosi odpowiednio od 610 jtk/m³ do 640 jtk/m³. Natomiast w sali położonej po stronie północnej budynku liczba grzybów wynosi od 280 jtk/m³ do 530 jtk/m³. Liczba gronkowców mannitolu-dodatnich i mannitolu-ujemnych w obydwu salach przed zajęciami jest porównywalna i wynosi od 0 jtk/m³ do 10 jtk/m³. Natomiast w trakcie zajęć liczba gronkowców jest wyższa w sali od strony północnej i wynosi od 80 jtk/m³ do 230 jtk/m³, podczas gdy w sali po stronie południowej – od 50 jtk/m³ do 60 jtk/m³. Brak gronkowców w wymazach z kratek wentylacyjnych oraz niska liczba gronkowców przed zajęciami, a wyższa podczas zajęć świadczy o tym, że głównym źródłem gronkowców jest człowiek. Natomiast wyższa liczba gronkowców w sali od strony północnej związana może być z obecnością liczniejszej grupy studentów podczas pomiarów w stosunku do liczby osób w sali od strony północnej. Wśród gronkowców dominowały formy mannitolu-ujemne. W jednej z badanych sal oprócz gronkowców mannitolu-ujemnych zaobserwowano również gronkowce mannitolu-dodatnie. Dodatkowe pomiary liczby drobnoustrojów w powietrzu zewnętrznym pokazały, że liczba bakterii psychrofilnych jest wyższa po stronie południowej i wynosi do 280 jtk/m³, podczas gdy po stronie północnej – 70 jtk/m³.

Natomiast liczba grzybów jest wyższa po stronie północnej i wynosi 470 jtk/m^3 , a po stronie południowej – 80 jtk/m^3 . Wymazy z powierzchni kratki wentylacyjnych nie wykazały obecności gronkowców w żadnym z badanych pomieszczeń dydaktycznych. Uzyskane wyniki poboru powietrza bezpośrednio z kratki wentylacyjnych wskazują na dość wysoką liczbę bakterii i grzybów w powietrzu pochodzącym z wentylacji grawitacyjnej. Zarówno liczba bakterii, jak i grzybów jest wysoka i wynosi odpowiednio od 610 jtk/m^3 do 720 jtk/m^3 . Natomiast liczba bakterii na powierzchni kratki wentylacyjnych była wyższa w pomieszczeniu po stronie północnej, gdzie wynosiła średnio $3/\text{cm}^2$ (w sali po stronie południowej $2/\text{cm}^2$).

4. Podsumowanie

Podsumowując przeprowadzone badania jakości powietrza w pomieszczeniach dydaktycznych wyposażonych jedynie w wentylację grawitacyjną przed zajęciami i w trakcie ich trwania oraz analizując skład bioaerozolu charakterystycznego dla powietrza wewnętrznego – zwracając zarazem szczególną uwagę na efekt zdrowotny oddziaływania toksyn bakteryjnych i grzybowych – można uznać, że pod względem mikrobiologicznym powietrze w badanych salach dydaktycznych przed zajęciami jest czyste i średnio czyste podczas trwania zajęć. Natomiast w trakcie zajęć powietrze staje się mocno zanieczyszczone gronkowcami. Oznacza to, że głównym źródłem zanieczyszczeń mikrobiologicznych jest człowiek. Również nie bez znaczenia pozostaje duża liczba bakterii i grzybów w powietrzu w kanałach wentylacyjnych. Osiągnięte wartości stężeń CO_2 wykraczają poza poziom uznawany za akceptowalny (1000 ppm). Dlatego wydaje się, że aby skutecznie zapobiegać zanieczyszczeniom i usuwać je z pomieszczeń, należy zastosować odpowiednio dobrany system wentylacji, zwłaszcza w budynku, który przeszedł termomodernizację polegającą na wymianie okien i dociepleniu. Czynnikiem kluczowym dla jakości powietrza w pomieszczeniu jest odpowiednia wymiana powietrza w budynku przy zastosowaniu wentylacji mechanicznej. Należy równocześnie pamiętać, że na skutek nieefektywnego działania systemów wentylacyjnych oraz braku właściwej obsługi i konserwacji może dochodzić do powstania nowych źródeł zanieczyszczeń. Dlatego mając na uwadze zapewnienie użytkownikom budynku odpowiednich warunków mikroklimatu i jakości powietrza, należy zawsze podejmować takie działania techniczne i organizacyjne, które ograniczą występowanie czynników szkodliwych.

Bibliografia

- [1] Sulaiman Z., Mohamed M., *Indoor air quality and sick building syndrome study at two selected libraries in Johor Bharu, Malaysia*, Environment Asia, 2011, vol. 4(1), s. 67–74, <https://doi.org/10.14456/ea.2011.10>.
- [2] Makowski M., Ohlmeyer M., *Comparison of a small and a large environmental test chamber for measuring VOC emissions from OSB made of Scots pine (Pinus sylvestris L.)*, European Journal of Wood and Wood Products: Holz als Roh- und Werkstoff, 2006, vol. 64, s. 469–472, <https://doi.org/10.1007/s00107-006-0123-y>.

- [3] Pies M., Hajovsky R., Velicka J., *Design, implementation and data analysis of an embedded system for measuring environmental quantities*, *Sensors*, 2020, vol. 20(8), nr art. 2304, <https://doi.org/10.3390/s20082304>.
- [4] Pietrucha T., *Measurement of carbon dioxide concentration for assessment of indoor air quality in the lecture hall*, [w:] *13th Students' Science Conference, Polanica-Zdrój Poland, 17–20 September 2015*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2015.
- [5] Hayleeyesus S.F., Manaye A.M., *Microbiological quality of indoor air in university libraries*, *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, 2014, vol. 4(suppl. 1), s. 312–317, <https://doi.org/10.12980/apjtb.4.2014c807>.
- [6] Seltzer J.M., *Biological contaminants*, *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 1994, vol. 94(2), s. 318–326, [https://doi.org/10.1016/0091-6749\(94\)90092-2](https://doi.org/10.1016/0091-6749(94)90092-2).
- [7] Sharma R., Gaur S.N., Singh V.P., Singh A.B., *Association between indoor fungi in Delhi homes and sensitization in children with respiratory allergy*, *Medical Mycology*, 2012, vol. 50(3), s. 281–290, <https://doi.org/10.3109/13693786.2011.606850>.
- [8] Sharma R., Deval R., Priyadarshia V., Gaur S.N., Singh V.P., Singh A.B., *Indoor fungal concentration in the homes of allergic/asthmatic children in Delhi, India*, *Allergy Rhinol (Providence)*, 2011, vol. 2(1), s. 21–32, <https://doi.org/10.2500/ar.2011.2.0005>.
- [9] Chirca I., *The hospital environment and its microbial burden: challenges and solutions*, *Future Medicine*, 2019, vol. 14(12), s. 1007–1010, <https://doi.org/10.2217/fmb-2019-0140>.
- [10] Brągoszewska E., Mainka A., Pastuszka J.S., Lizończyk K.L., Desta Y.G., *Assessment of bacterial aerosol in a preschool, primary school and high school in Poland*, *Atmosphere*, 2018, vol. 9(3), nr art. 87, <https://doi.org/10.3390/atmos9030087>.
- [11] PN-B-03430:1983/Az3:2000, *Wentylacja w budynkach mieszkalnych zamieszkania zbiorowego i użyteczności publicznej – Wymagania* (opublikowana 8.02.2000, wycofana 7.09.2015), Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
- [12] *Obwieszczenie Ministra Rozwoju i Technologii z dnia 15 kwietnia 2022 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie*, Dz.U. 2022 poz. 1225.
- [13] Gładyszewska-Fiedoruk K., Zhelykh V., Pushchinskyi A., *Simulation and analysis of various ventilation systems given in an example in the same school of indoor air quality*, *Energies*, 2019, vol. 12(15), nr art. 2845, <https://doi.org/10.3390/en12152845>.
- [14] PN-Z-04111-02:1989, *Ochrona czystości powietrza – Badania mikrobiologiczne – Oznaczanie liczby bakterii w powietrzu atmosferycznym (imisja) przy pobieraniu próbek metodą aspiracyjną i sedymentacyjną* (opublikowana 2.05.1989, wycofana 25.08.2015), Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
- [15] PN-Z-04111-03:1989, *Ochrona czystości powietrza – Badania mikrobiologiczne – Oznaczanie liczby grzybów mikroskopowych w powietrzu atmosferycznym (imisja) przy pobieraniu próbek metodą aspiracyjną i sedymentacyjną* (opublikowana 2.05.1989, wycofana 13.08.2015), Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.

PRZEMIANY ZBIORNIKÓW WODNYCH W KRAKOWIE I OKOLICY W LATACH 1999–2023

Aleksandra Wagner¹

¹AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska,
Kraków, Polska

e-mail: awagner@agh.edu.pl

Słowa kluczowe: zbiorniki powyrobiskowe, stawy, kąpieliska, zagospodarowanie terenu, rekreacja

Streszczenie: W rozdziale przedstawiono zmiany zagospodarowania wybranych zbiorników wodnych w Krakowie oraz gminie Niepołomice. Przeanalizowano przemiany w następujących zbiornikach wodnych w Krakowie: Zakrzówek, Bagry, Staw Dąbski, Przylasek Rusiecki oraz w gminie Niepołomice: zbiornik przy Zamku w Niepołomicach, zbiornik przy ulicy Akacyjowej w Niepołomicach, zbiorniki w Woli Batorskiej i Zabierzowie Bocheńskim. Część zbiorników zagospodarowana została jako kąpieliska. W ostatnich latach obserwuje się tendencję do tworzenia coraz to większej liczby atrakcji na terenie samego zbiornika wodnego i w jego okolicy. Największym przemianom uległo zagospodarowanie byłego kamieniołomu Zakrzówek oraz Stawu Dąbskiego. Oba zbiornikom nadano status użytków ekologicznych.

1. Wprowadzenie

Rajon Krakowa nie obfituje wprawdzie w duże naturalne zbiorniki wodne, jednakże w samym Krakowie i okolicy znaleźć można wiele sztucznych zbiorników wodnych różnej wielkości. Większość z nich to zbiorniki powstałe jako uboczny efekt eksploatacji, ale występują też stawy hodowlane oraz zbiorniki utworzone na potrzeby gromadzenia wody do celów przemysłowych i/lub rekreacyjnych [1–3]. Na przestrzeni wielu lat dochodziło do różnych zmian związanych z kształtem i powierzchnią zbiornika, jego funkcją, zagospodarowaniem terenu wokół niego, a także zmian we florze i faunie oraz składzie chemicznym wody (stopniu zanieczyszczenia). Celem pracy było przebadanie przemian zachodzących w czterech krakowskich i czterech niepołomickich zbiornikach wodnych lub ich zespołach. Zbiorniki te pełnią rozmaite funkcje: przyrodniczą, dekoracyjną, gospodarczą (połów ryb) oraz rekreacyjną. Funkcje te zależą przede wszystkim od wielkości zbiornika oraz jego dostępności zarówno w aspekcie fizycznym, jak i w związku z kwestiami własnościowymi.

2. Obszar i metodyka badań

Przedmiotem badań były następujące zbiorniki wodne i ich kompleksy:

- na terenie Krakowa:
 - Zakrzówek,
 - Bagry Wielkie,
 - Staw Dąbski,
 - Przylasek Rusiecki;
- na terenie miasta i gminy Niepołomice:
 - zbiornik przy Zamku w Niepołomicach,
 - zbiornik przy ulicy Akacjowej w Niepołomicach,
 - zbiorniki w Woli Batorskiej,
 - żwirownia w Zabierzowie Bocheńskim.

Ich charakterystyka podana jest w podrozdziałach 2.1 i 2.2.

Badania prowadzone były metodą bezpośredniej obserwacji, wywiadów z osobami pracującymi w organach samorządowych oraz mieszkańcami Krakowa i okolic. Wykorzystano również informacje zawarte w literaturze przedmiotu oraz materiałach wydawanych przez władze samorządowe.

2.1. Zbiorniki na terenie Krakowa

Zakrzówek

Położony w Dzielnicy VIII Dębniki zalew na Zakrzówku (rys. 1–3) powstał w wyniku działalności kamieniołomu wapienia (1906–1990) wydobywanego na potrzeby Krakowskich Zakładów Sodowych „Solvay”. Powierzchnia wyrobiska wynosiła 23,4 ha, głębokość 45 m [4]. Zbiornik składa się z dwóch połączonych ze sobą części: większej i mniejszej.



Rys. 1. Zbiornik Zakrzówek, 2005 r.

(opracowanie własne na podstawie zdjęcia z Centralnego Zasobu Geodezyjnego i Kartograficznego (CZGiK))



Rys. 2. Zbiornik w Zakrzówku. Widok od strony zachodniej, duży zbiornik – centrum nurkowania, 9.12.2007 r. (fot. A. Wagner)



Rys. 3. Zbiornik w Zakrzówku. Mały zbiornik – pomosty z basenami, 10.09.2023 r. (fot. A. Wagner)

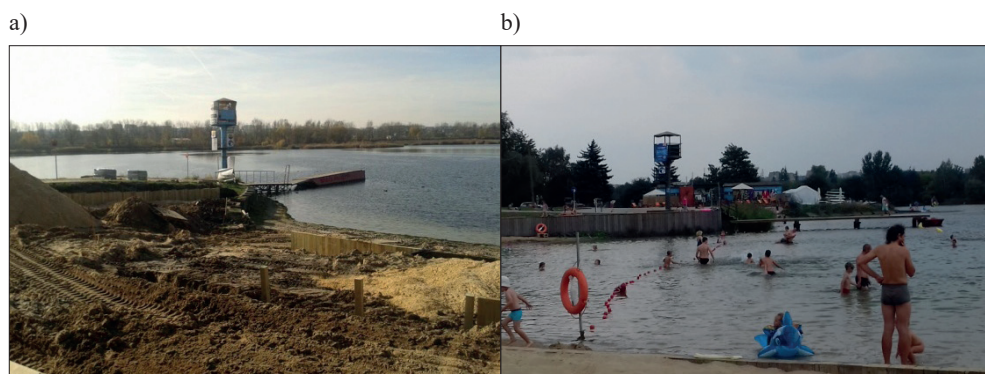
Bagry (inaczej Bagry Wielkie)

Zalew ten (rys. 4, 5) położony jest w Dzielnicy XIII (Podgórze). W literaturze można znaleźć drobne rozbieżności na temat powierzchni zbiornika. Najniższą wartość (22,9 ha) podają R. Ogar i M.J. Skiba [5], a najwyższą (31,4 ha) Z. Kasztelewicz [6]. Zbiornik Bagry powstał po wydobyciu gliny, piasku i kruszywa. Początek eksploatacji datuje się na przełom XIX i XX wieku, kiedy to pozyskiwano glinę dla licznych cegielni [7]. W czasie II wojny światowej Niemcy prowadzili intensywną eksploatację piasku i kruszywa potrzebnego do

budowy nasypów kolejowych, bowiem intensywnie rozbudowywano wtedy węzeł kolejowy, głównie na potrzeby transportów wojskowych. W 1945 roku wycofujący się Niemcy wyłączyli pompy i zbiornik samoistnie napełnił się wodami gruntowymi. Eksploatację wznowiono (ale tylko w części zbiornika) w latach sześćdziesiątych, a ostatecznie zaprzestano w latach siedemdziesiątych. Średnią głębokość obliczono na 4,66 m, a głębokość maksymalną na 7,8 m [8].



Rys. 4. Zalew Bagry Wielkie (opracowanie własne na podstawie zdjęcia z CZGiK)



Rys. 5. Kąpielisko na Bagrach: a) 4.11.2016 r.; b) 24.08.2018 r.
(fot. A. Wagner)

Staw Dąbski

Staw ten (rys. 6–8) znajduje się w rejonie Krakowa zwanym Dąbie, należącym do Dzielnicy II (Grzegórzki). Powstał w okresie międzywojennym, po wydobywaniu gliny dla pobliskiej cegielni. Do lat sześćdziesiątych XX wieku powstało tam kilka zbiorników wod-

nych, które później były sukcesywnie zasypywane. Wiązało się to z budową przelotowej arterii (aleja Pokoju) oraz tworzeniem ogródków działkowych. Ostatecznie pozostał tylko jeden zbiornik. W roku 1975 jego powierzchnia liczyła 2,7 ha. W kolejnych ulegała zmniejszaniu: w 1983 roku wynosiła 2,34 ha, a w 1993 – 2,28 ha (wartości otrzymane na podstawie analizy zdjęć z CZGiK za pomocą QGIS). Maksymalna głębokość zbiornika wynosi 4 m [9].



Rys. 6. Staw Dąbski w różnych okresach. Kolory: amarantowy – 1965 r. (3,21 ha + 0,51 ha + 0,24 ha); czerwony – 1975 r. (2,7 ha); zielony – 1998 r. (2,57 ha); turkusowy – 2005 r. (2,09 ha) (opracowanie własne na podstawie zdjęcia z CZGiK)



Rys. 7. Staw Dąbski, 9.07.2008 r. Na drugim planie Centrum Handlowo-Rozrywkowe „Plaza” (fot. A. Wagner)



Rys. 8. Staw Dąbski, 19.06.2023 r. Rozbiórka Centrum Handlowo-Rozrywkowego „Plaza”
(fot. A. Wagner)

Przylasek Rusiecki

Żwirownia w Przylasku Rusieckim (rys. 9, 10) stanowi kompleks kilkunastu zbiorników wodnych w Dzielnicy XVIII (Nowa Huta), powstałych po eksploatacji kruszywa.



Rys. 9. Stawy w Przylasku Rusieckim. Plaża zaznaczona na czerwono
(opracowanie własne na podstawie zdjęcia z CZGiK)



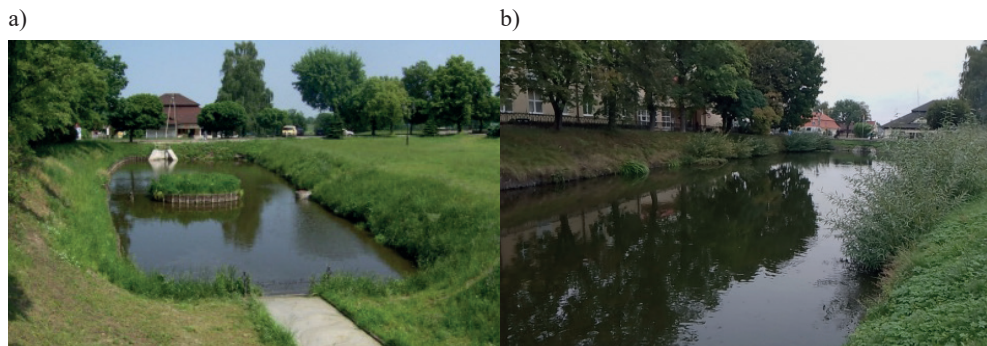
Rys. 10. Przylasek Rusiecki. Staw 1 – widok na plażę i wypożyczalnię sprzętu sportowego, 23.06.2016 r. (fot. A. Wagner)

Łączna powierzchnia zbiorników wynosi 82,19 ha (na podstawie zdjęć lotniczych z 2005 roku), zaś łączna powierzchnia terenu (baseny i obszar lądowy) – 181,27 ha [10]. W badaniach koncentrowano się na najbardziej wysuniętym na wschód zbiorniku, o powierzchni 21,36 ha.

2.2. Zbiorniki na terenie miasta i gminy Niepołomice

Zbiornik przy Zamku w Niepołomicach

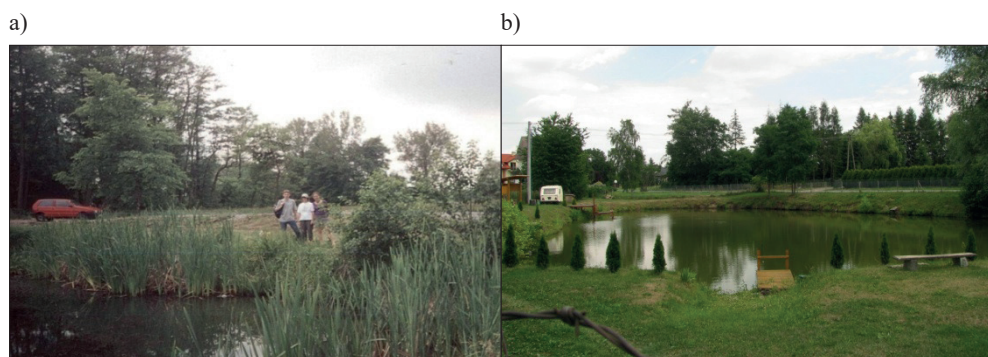
W centrum Niepołomic przy ulicy Zamkowej znajduje się niewielki (około 0,12 ha – na podstawie geoportal.gov.pl) zbiornik wodny (rys. 11). Do zbiornika doprowadzony jest strumień, który jednak często wysycha.



Rys. 11. Staw przy ulicy Zamkowej w Niepołomicach, widok od strony ulicy Mickiewicza: a) maj 2007 r. (widoczna wyseпка); b) 24.09.2023 r. (fot. A. Wagner)

Zbiornik przy ulicy Akacjowej w Niepołomicach

Zbiornik znajduje się u styku ulic Akacjowej, Słonecznej, Wiśniowej i Na Tamie (rys. 12). Powierzchnia zbiornika wynosi około 0,3 ha, głębokość średnia – około 1 m, a głębokość maksymalna – 1,5 m [11]. Akwen był niegdyś zbiornikiem przeciwpożarowym. Zbiornik zasilany jest przez wody gruntowe (Marian Zaręba i Grzegorz Sendor – informacja ustna, 2007).



Rys. 12. Staw przy ulicy Akacjowej w Niepołomicach:
a) 2002 r. (porośnięty pałą); b) 2017 r. (zagrodzony)
(fot. A. Wagner)

Zbiorniki w Woli Batorskiej

Zbiorniki powstały w wyniku eksploatacji żwiru. Ich powierzchnia jest zmienna i stale rośnie, ponieważ eksploatacja trwa nadal. W roku 1998 zbiorniki zajmowały 4,2 ha (według QGiS), a około 2017 roku już 48,4 ha (według Google Maps) (rys. 13–15).



Rys. 13. Zdjęcia zbiorników wodnych w Woli Batorskiej:
a) CZGiK (2005 r.); b) Google Maps (dostęp 1.10.2023 r.)



Rys. 14. Zdjęcia zbiorników wodnych w Woli Batorskiej:
a) CZGiK (2005 r.); b) Google Maps (dostęp 1.10.2023 r.)



Rys. 15. Staw w Woli Batorskiej – widoczny grzybieńczyk wodny (*Nymphaoides peltata*), 18.07.2018 r.
(fot. A. Wagner)

Żwirownia w Zabierzowie Bocheńskim

Żwirownia (rys. 16, 17) położona jest pomiędzy wsiami Zabierzów Bocheński, Ulesie, Sołtysie i Zaborze. Po wydobywaniu żwiru powstały dwa zbiorniki wodne o powierzchni 13,03 ha i 3,43 ha (według QGIS).



Rys. 16. Zbiorniki w Zabierzowie Bocheńskim
(Google Maps, dostęp: 1.10.2023 r.)



Rys. 17. Plaża w Zabierzowie Bocheńskim, 9.07.2013 r. (fot. A. Wagner)

W pracy prześledzono zmiany zachodzące w wymienionych uprzednio zbiornikach od roku 1999 do roku 2022 (w przypadku niektórych zbiorników nawet do 2023 roku). Zastosowano bezpośrednią obserwację, posłużono się też danymi literaturowymi oraz przeprowadzono rozmowy z ludźmi.

3. Wyniki i dyskusja

Wyniki zebrano w tabelach 1 i 2.

Wszystkie badane zbiorniki krakowskie w pewnym okresie pełniły formalną lub nieformalną funkcję kąpielisk. Bagry Wielkie i Przylasek Rusiecki były nimi przez cały czas. Zbiornik w Zakrzówku początkowo służył jako nieformalne kąpielisko, później obowiązywał zakaz kąpieli ze względu na strome ściany kamieniołomu, gwałtownie obniżające się dno, a co za tym idzie – duże ryzyko utonięcia. Dopiero w 2023 roku otwarto kąpielisko, przy czym nie uwzględniono potrzeb osób przyjeżdżających samochodami. Nie zadbano o wystarczającą liczbę miejsc do parkowania. Wstęp jest bezpłatny, ale limitowany. Z uwagi na dużą liczbę chętnych zaistniała obawa, że pomosty (platformy) nie wytrzymają i dojdzie do katastrofy. Ograniczono więc liczbę osób mogących jednorazowo przebywać na platformach, a to doprowadziło do powstania olbrzymich kolejek.

Tabela 1. Zmiany w zbiornikach wodnych na terenie Krakowa

Zbiorniki wodne	Zmiany pola powierzchni w latach 1999–2023	Funkcja i sposób użytkowania	Zagospodarowanie terenu	Flora i fauna	Inne uwagi
Zakrzówek	Bez większych zmian	Do połowy pierwszej dekady XXI w. nieformalne kąpielisko, później zakaz przestrzegany bardziej rygorystycznie, dostęp utrudniony. W roku 2023 otwarto kąpielisko. Od 26.09.2018 – użytek ekologiczny, pow. 17,50 ha [12]	Na początku XXI w. teren był częściowo własnością miasta, a częściowo firmy Gerium, od której Klub Płetwonurków Kraken dzierżawił część terenu i na dużym akwenu, wybudował centrum nurkowania (rys. 2). W 2016 r. teren wykupiło miasto, które rozpoczęło budowę basenów	Akwen czasem odwiedzany przez kaczki krzyżówki <i>Anas platyrhynchos</i> . Na okolicznych łąkach występuje motyl modraszek telejus <i>Phengaris teleius</i>	Zła organizacja kąpieliska, limitowana liczba odwiedzających, zamiast zorganizowania miejsc parkingowych wystawia się mandaty karne za niewłaściwe parkowanie, zakładając przy tym blokady na samochody

Zbiorniki wodne	Zmiany pola powierzchni w latach 1999–2023	Funkcja i sposób użytkowania	Zagospodarowanie terenu	Flora i fauna	Inne uwagi
Bagry	Bez zmian w latach 1999–2023	Kąpielisko, park miejski [13], ośrodek sportów wodnych, wędkarstwo amatorskie	W ramach budżetu obywatelskiego (2015, 2017) prowadzono przebudowę infrastruktury. Zmodernizowano ścieżki, utworzono alejki, otwarto punkty gastronomiczne. W 2021 r. otwarto tętnię solankową	Liczne gatunki ptactwa, między innymi: rybitwa rzeczna, perkoz dwuczuby, łabędź niemy. Dosadzono ogrodowe odmiany grzybienia (<i>Nymphaea alba</i>)	Miejsce licznych imprez sportowych i kulturalnych
Staw Dąbski	Zmniejszenie powierzchni 1998 – 2,57 ha, po wybudowaniu Centrum Handlowego „Plaza” – 2,09 ha (QGIS)	Do roku 1999 (budowa „Plazy”) – nieformalne kąpielisko, obecnie zakaz kąpeli, wędkarstwo amatorskie. Użytek ekologiczny [14]	1999 – budowa „Plazy”. 2008 – budowa „Decathlonu”. 2010 – budowa osiedla mieszkaniowego. 2019 – zakończenie działalności „Plazy”. 2023 – rozbiórka budynków „Plazy”	W wodach stwierdzono występowanie różanki (<i>Rhodeus sericeus amarus</i>) [15]. Liczne gatunki ptactwa. Obecność płazów	Duże zagrożenie związane z licznymi inwestycjami budowlanymi prowadzącymi do izolacji zbiornika
Przylasek Rusiecki	Bez zmian w latach 1999–2023	Wędkarstwo amatorskie, kąpielisko na jednym ze stawów	2016 – urozmaicenie oferty sportów wodnych	Łabędź niemy (rzadziej obserwowany w ostatnich latach)	Wzrost cen za parkowanie

Z kolei Bagry mogą być przykładem dobrego zagospodarowania. Tam również wstęp jest bezpłatny, nie jest też limitowany. Parking nie jest duży, ale istnieje możliwość parkowania poza nim.

Staw Dąbski obecnie pełni głównie funkcję estetyczną oraz funkcję użytku ekologicznego. W celu ochrony płazów zbudowano dla nich przepusty. Problemem jest jednak izolacja zbiornika.

Spośród badanych zbiorników znajdujących się w mieście i gminie Niepołomice jako kąpielisko wykorzystywany jest jedynie zbiornik w Zabierzowie Bocheńskim. W przyszłości będzie możliwość utworzenia kąpieliska w Woli Batorskiej.

Ważną rolę odgrywa też wędkarstwo. Wszystkie omawiane zbiorniki zostały zarybione. Zbiornik przy zamku niepołomickim jest prawdopodobnie miejscem hodowli ryb, dlatego też są one tam chronione i obowiązuje zakaz odławiania.

Flora zbiorników jest zróżnicowana. Obok roślin, które pojawiły się spontanicznie, są tam rośliny sadzone przez człowieka. Przykładem tych ostatnich jest różowa odmiana grzybienia białego (*Nymphaea alba*) oraz grzybieńczyk wodny (*Nymphoides peltata*).

Tabela 2. Zmiany w zbiornikach wodnych na terenie miasta i gminy Niepołomice

Zbiorniki wodne	Zmiany pola powierzchni w latach 1999–2023	Funkcja i sposób użytkowania	Zagospodarowanie terenu	Flora i fauna	Inne uwagi
Niepołomice – przy Zamku	Bez zmian w latach 1999–2023	Początkowo zbiorniki przeciwpożarowy i staw. Staw jest miejscem hodowli ryb karpiovatych, przy czym jest zakaz połowu ryb	W roku 2006 przeprowadzono gruntowny remont, na środku utworzono wysepkę, która jednak po kilku latach zanikła	Staw odwiedzany przez kaczki krzyżówki, w pobliżu zasadzono drzewa, m.in. korkowiec amurski (<i>Phellodendron amurense</i>)	Staw jest położony w zabytkowym centrum miasta, w związku z czym jego wygląd ma istotne znaczenie
Niepołomice – przy ulicy Akacjowej	Bez zmian w latach 2002–2022	Początkowo zbiorniki przeciwpożarowy, później ogrodzony – miejsce hodowli i połowu ryb	Początkowo teren ogólnodostępny. W 2007 r. renowacja zbiornika, ogrodzenie	W 2002 r. obserwowano pałkę szerokolistną (<i>Typha latifolia</i>). Miejsce rozrodu płazów, w 2007 r. usunięto pałkę	Obecnie dostęp ograniczony
Zbiorniki w Woli Batorskiej	Wzrost powierzchni w latach 1998–2022	Miejsce hodowli i połowu ryb	W dalszym ciągu trwa eksploatacja kruszywa	Liczne ptactwo, m.in. bocian biały (<i>Ciconia ciconia</i>). W 2017 r. pojawił się grzybieńczyk wodny (<i>Nymphoides peltata</i>). Prawdopodobnie posadzony celowo	Zakaz kąpiei, nie zawsze przestrzegany
Zabierzów Bocheński	Bez zmian w latach 1999–2023	Wędkarstwo i kąpielisko	Do roku 2009 – kąpielisko niestrzeżone. W 2010 r. teren zakupił prywatny inwestor, który następnie utworzył miejsce wędkowania i kąpielisko strzeżone oraz zbudował osiedle domków kempingowych	Liczne gatunki ptactwa, m.in. perkoz dwuczuby, perkoz zausznik. Szuwar trzcinowo-pałkowy, grążel żółty (<i>Nuphar luteum</i>), salwinia pływająca (<i>Salvinia natans</i>)	Wstęp za opłatą

4. Wnioski

Zbiorniki wodne w Krakowie i rejonie Niepołomic ulegały większym lub mniejszym zmianom. Spośród ośmiu zbiorników zmiany powierzchni nastąpiły w dwóch, przy czym w jednym przypadku (Staw Dąbski) doszło do zmniejszenia powierzchni, w drugim zaś przypadku (Wola Batorska) powierzchnia akwenu wzrosła. Zmiany w zagospodarowaniu polegały głównie na udogodnieniach praktycznych. Zbiorniki wodne i ich otoczenie stanowią ostoję bioróżnorodności.

Bibliografia

- [1] Wagner A., *Rola zbiorników wodnych w zrównoważonym rozwoju na przykładzie gminy Niepołomice*, Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej im. H. Kołłątaja w Krakowie, nr 434, Inżynieria Środowiska, 2006, z. 28, s. 203–208.
- [2] Wagner A., *Nature-based tourism in anthropogenic landscape: focus on water bodies in the Krakow area* [Turystyka ekologiczna w krajobrazie antropogenicznym ze szczególnym uwzględnieniem zbiorników wodnych w rejonie Krakowa], [w:] Bień J., Nowak W. (eds.), *Environmental Protection into the Future*, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2007, s. 455–463.
- [3] Pietrzyk-Sokulska E., *Zbiorniki wodne w województwie małopolskim jako istotny element jakości środowiska. Cz. 2. Charakterystyka wybranych, antropogenicznych zbiorników wodnych województwa małopolskiego*, Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk, 2011, nr 80, s. 37–65.
- [4] Chwastek J., Mikołajczak J., *Zagospodarowanie poeksploatacyjne Kamieniołomu „Zakrzówek”*, [w:] Paulo A. (red.), *Sozologia na obszarze antropopresji – przykład Krakowa: Przewodnik III Konferencji Sozologicznej, Kraków 23–24 kwietnia 1993*, AGH, Kraków 1993, s. 51–59.
- [5] Ogar R., Skiba M.J., *Opinia hydrogeologiczna dotycząca obniżenia zwierciadła wody w Stawie Płaszowskim w Krakowie*, Przedsiębiorstwo Hydrogeologiczne „HYDRODOL”, Tarnów 2016, <https://www.krakow.pl/zalacznik/258462>.
- [6] Kasztelewicz Z., *Rekultywacja terenów pogórnich w polskich kopalniach odkrywkowych: Monografia*, Fundacja Nauka i Tradycje Górnicze z siedzibą Wydział Górnicztwa i Geoinżynierii Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie, Agencja Wydawniczo-Poligraficzna ART-TEKST, Kraków 2010.
- [7] Chytkowska E., *Bagry*, Głos Podgórza: Biuletyn Informacyjny Dzielnicy XIII, 2008, nr 3(41), s. 8.
- [8] Gawalkiewicz R., *Bagry lake – Volume 1. A bibliographic query of literature and archive data in explaining the evolution of the water*, Geoinformatica Polonica, 2017, vol. 16, s. 115–126.
- [9] Szczęsny B., Ciszewski D., Pociask-Karteczka J., Żelazny M., Wilk-Woźniak E., Żurek R., Amirowicz A., Zajac K., Kurzyński J., *Staw Dąbski. Sprawozdania I etapu badań ekologicznych „Stawu Dąbskiego” wykonanych w 2003 r. na zlecenie „Fundacji Partnerstwo dla Środowiska”*, IOP PAN, Kraków 2003 [niepublikowane].

-
- [10] Kudłek J., Pępkowska A., Walasz K., Weiner J., *Koncepcja ochrony różnorodności biologicznej miasta Krakowa*, Instytut Nauk o Środowisku UJ, Kraków 2005.
 - [11] Mikuła J., Dębowska M., Gastoł S., Mikuła W., Kaproń P., Krysa D. (red.), *Program ochrony środowiska dla miasta i gminy Niepołomice*, Przedsiębiorstwo Usługowe „Południe II”, Niepołomice 2005.
 - [12] Uchwała nr CXI/2916/18 Rady Miasta Krakowa z dnia 26 września 2018 r. w sprawie ustanowienia użytku ekologicznego „Zakrzówek”.
 - [13] Uchwała nr LII/980/16 Rady Miasta Krakowa z dnia 14 września 2016 r. w sprawie nadania nazwy parku i przyjęcia regulaminu parku.
 - [14] Uchwała nr XC/1202/10 Rady Miasta Krakowa z dnia 13 stycznia 2010 r. w sprawie ustanowienia użytku ekologicznego „Staw Dąbski”.
 - [15] Waszkiewicz M., *O ochronę stawu Dąbie!*, Zielone Brygady, 1999, nr 18(144).

ZNACZENIE ROŚLINNOŚCI WIELOLETNIEJ ORAZ ŁĄK KWIETNYCH W URZĄDZANIU ZIELENI MIEJSKIEJ NA PRZYKŁADZIE PARKU KRAKOWSKIEGO I PARKU JORDANA W KRAKOWIE

Aleksandra Wagner¹

¹AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Kraków, Polska

e-mail: awagner@agh.edu.pl

Słowa kluczowe: łąki kwietne, roślinność wieloletnia, zieleń miejska, parki miejskie, bioróżnorodność

Streszczenie: Tereny zieleni miejskiej odgrywają szczególną rolę w realizacji zasad rozwoju zrównoważonego. Znacząca jest jej rola ekologiczna, polegająca na zwiększaniu bioróżnorodności, oraz rola ekonomiczna i społeczna. Nieruchomości położone w pobliżu terenów zieleni zyskują na wartości. Niezaprzeczalna jest też rola zieleni w poprawie jakości życia ludzi. Istnieją różne formy zieleni miejskiej, nie wszystkie wypełniają swą rolę jednakowo dobrze. Tradycyjne trawniki stanowią dobre miejsce wypoczynku ludzi, jednakże nie są atrakcyjne dla owadów, ich potencjał zwiększania bioróżnorodności jest więc ograniczony. Wymagają też znacznej ilości wody oraz częstego koszenia. Dużego nakładu pracy wymagają również klomby z roślinnością kwitnącą. Są to często gatunki kwitnące krótko, które po przekwitnięciu należy usunąć i zastąpić nowymi. Alternatywą wobec trawników i klombów z roślinnością sezonową są rośliny wymagające znacznie mniej zabiegów pielęgnacyjnych oraz mniej wody. Są to byliny oraz rośliny jednoroczne, których nasiona rozsiewają się spontanicznie, co umożliwia funkcjonowanie łąk kwietnych. Praca skupia się na parku Krakowskim, którego rewitalizację przeprowadzono w latach 2017–2018. W ramach rewitalizacji na części parku zasadzono byliny. W 2022 i 2023 roku autorka przeprowadziła obserwacje kwitnących roślin oraz odwiedzających je owadów. Podobne obserwacje prowadzono w parku Jordana.

1. Wprowadzenie

Zieleń miejska pełni ważne funkcje ekologiczne, społeczne i ekonomiczne, tym samym pozostaje w ścisłym związku z zasadami zrównoważonego rozwoju [1]. Dla realizacji tych zasad nie jest jednakże obojętne, jakiego rodzaju jest to zieleń. Pożądane cechy zieleni to, oprócz walorów estetycznych, jak największe wspomaganie bioróżnorodności. Ważne jest

też, by te dwie cechy utrzymywały się możliwie długo, najlepiej przez cały sezon wegetacyjny. Tymczasem w strefach umiarkowanych coraz częściej z utratą większości walorów zieleni mamy do czynienia nie tylko w okresie późnej jesieni i zimy, ale też w lecie, gdy pojawia się susza. Konieczne wzmożone podlewanie roślin w czasie suszy wiąże się z większym zużyciem wody [2]. Dlatego pożądaną cechą roślinności używanej w urządzeniu zieleni miejskiej jest odporność na suszę. W rejonach o klimacie suchym coraz częściej tradycyjna zielen (skwery, rabaty kwiatowe) zastępowana jest sukulentami [3]. Rozwiązania takie widzimy w krajach o klimacie śródziemnomorskim (rys. 1).



Rys. 1. Sukulenty *Aloë cameronii* Hemsl. Lizbona, plac przed szpitalem im. Curry'ego Cabrala, czerwiec 2016 r. (fot. A. Wagner)

W chłodniejszym klimacie jednak większość sukulentów nie może być utrzymywana przez cały rok na otwartej przestrzeni, a te gatunki, które wytrzymują silniejsze mrozy, są zazwyczaj niewielkich rozmiarów (rys. 2).

Tradycyjnie utrzymywana zielen wymaga sporo zabiegów pielęgnacyjnych. Trawniki muszą być przycinane, a na rabatach roślinność zazwyczaj musi być wymieniana kilka razy w ciągu roku, by zapewnić jej estetyczny wygląd przez cały sezon wegetacyjny. Wygodniejszym rozwiązaniem jest dobór takich roślin, które zbyt wielu zabiegów pielęgnacyjnych nie wymagają. Warunki te spełniają płaty roślinności wieloletniej (bylin). Nie wymagają one częstego koszenia (wystarczy dwa razy w roku). Części trwałe (kłącza, cebulki itp.) bylin magazynują wodę, w związku z czym z reguły nie wymagają dodatkowego podlewania. Ze względu na to, że na jednym płacie roślinności można posadzić wiele gatunków, bez szczególnych zabiegów możemy oglądać rośliny kwitnące przez cały sezon wegetacyjny. Zamiast bylin stosować można rośliny jednoroczne, które mogą spontanicznie rozsiewać nasiona.



Rys. 2. Sukulenty w ogrodzie wertykalnym, Bruksela 2021 r. (fot. A. Wagner)

2. Obszar badań i metody

Obserwacje prowadzone były w parku Krakowskim im. Marka Grechuty (rys. 3) oraz w parku im. Henryka Jordana (rys. 4). Oba parki powstały z końca XIX wieku. Oba znajdują się w Dzielnicy V (Krowodrza). Park Krakowski w latach 2017–2018 przechodził rewitalizację, którą prowadził Marcin Gajda (firma Gajda Architektura Krajobrazu) we współpracy z niemieckim architektem krajobrazu Heinerem Luzem (biuro LUZ Landschaftsarchitekten München). W ramach rewitalizacji na powierzchni około 1 ha (cały park to około 5 ha) utworzono płyty z różnych gatunków bylin [4]. Z kolei w parku Jordana (21,5 ha) w 2017 roku założono dwa płyty roślinności łąkowej o powierzchni około 0,17 ha i 0,09 ha (zmierzono na podstawie Google Maps).



Rys. 3. Park Krakowski – okolice sadzawki, 12.08.2023 r. (fot. A. Wagner)



Rys. 4. Park Jordana – łąka kwietna, 10.10.2023 r. (fot. A. Wagner)

Badania autorki polegały na bezpośredniej obserwacji gatunków roślin oraz odwiedzających je owadów. W identyfikacji roślin pomocna była aplikacja PlantNet, a w identyfikacji owadów – Obiektyw Google. Celem pracy było zbadanie, czy łąki kwietne oraz płyty roślinności wieloletniej spełniają funkcje ekologiczne (zwiększanie bioróżnorodności) i estetyczne (kwitnienie w różnych porach roku).

3. Wyniki i dyskusja

Wyniki obserwacji przedstawiono w tabelach 1 i 2. Nie obejmują one wszystkich gatunków występujących w podanych parkach, ale skupiają się na kwitnących gatunkach roślin.

Tabela 1. Obserwacje roślin kwitnących i owadów w płatach roślinności wieloletniej w parku Krakowskim

Data	Rośliny kwitnące	Owady	Uwagi
12.06.2022	Tawlina jarzębolistna (<i>Sorbaria sorbifolia</i>)	Pszczoła miodna (<i>Apis mellifera</i>)	Pszczoły bardzo liczne
	Bodziszek (<i>Geranium</i> sp.)	Pszczoły (<i>Apis mellifera</i>) i trzmiele (<i>Bombys</i> sp.) Biedronka arlekin (<i>Harmonia axyridis</i>)	–
	<i>Gillenia trifoliata</i>	–	–
7.07.2022	Malwa różowa (<i>Alcea rosea</i>)	Pszczoła miodna (<i>Apis mellifera</i>)	–
	Tawlina jarzębolistna (<i>Sorbaria sorbifolia</i>)	Pszczoła miodna (<i>Apis mellifera</i>) <i>Isodontia mexicana</i>	–
	Liliowiec (<i>Hemerocallis</i> sp.)	–	Dominuje przy sadzawce
	Jęczyzka Przewalskiego (<i>Ligularia przewalskii</i>)	–	–
	<i>Lysimachia clethroides</i>	<i>Volucella zonaria</i>	–
	Wierzbówka (<i>Epilobium</i> sp.)	–	–
7.07.2022	Jarzmianka większa (<i>Astrantia major</i>)	Taszczyń pszczeli (<i>Philanthus triangulum</i>) <i>Isodontia mexicana</i> Mucha zielona (<i>Lucilia sericata</i>)	–
23.03.2023	Krokus (<i>Crocus</i> sp.) Ciemniak (<i>Helleborus</i> sp.)	–	–
28.05.2023	Przywrotnik (<i>Alchemilla</i> sp.) Chaber górski (<i>Centaurea montana</i>)	–	Od strony placu Inwalidów
5.06.2023	<i>Amsonia tabernaemontana</i>	–	W pobliżu sadzawki

Tabela 2. Obserwacje roślin kwitnących i owadów w płatach roślinności łąkowej w parku Jordana

Data	Rośliny kwitnące	Owady	Uwagi
27.06.2022	Ostrożeń (<i>Cirsium</i> sp.)	Trzmiel (<i>Bombys</i> sp.)	–
4.07.2022	Hortensja (<i>Hydrangea serrata</i>)	Pszczoła miodna (<i>Apis mellifera</i>)	Poza łąką kwietną
	Roślinność trawiasta	–	Roślinność trawiasta dominuje Trawa wysuszona
	Ślacz piżmowy (<i>Malva moschata</i>)	Pszczoła miodna (<i>Apis mellifera</i>)	–

Tabela 2 cd.

Data	Rośliny kwitnące	Owady	Uwagi
12.08.2023	Kosmos pierzasty (<i>Cosmos bipinnatus</i>)	–	Kosmos dominuje
10.10.2023	Kosmos pierzasty (<i>Cosmos bipinnatus</i>) Nachylek barwierski (<i>Coreopsis tinctoria</i>) Dzika marchew (<i>Daucus carota</i>) Nagietek lekarski (<i>Calendula officinalis</i>) Wiesiołek dwuletni (<i>Oenothera biennis</i>) Cykoria podróżnik (<i>Cichorium intybus</i>) Krwawnik (<i>Achillea</i> sp.) Słonecznik (<i>Helianthus</i> sp.) Powój trójbarwny (<i>Convolvulus tricolor</i>)	Brak owadów z powodu niskiej temperatury	Kosmos dominuje

Zarówno w parku Krakowskim, jak i w parku Jordana oprócz wielogatunkowych płatów roślinności badano też krzewy posadzone poza tymi płatami. W przypadku parku Krakowskiego to była tawlina jarzębolistna (*Sorbaria sorbifolia*), roślina bardzo licznie odwiedzana przez pszczoły (rys. 5).



Rys. 5. Pszczoły na tawlinie (fot. A. Wagner)

Obficie kwitnącym krzewem w parku Jordana była hortensja (*Hydrangea*), na której również obserwowano pszczoły, choć nie tak licznie. W parku Jordana na łąkach kwiatnych dominowała roślinność jednoroczna, ale występowały też rośliny wieloletnie, na przykład nachylek barwierski (*Coreopsis tinctoria*).

W obu parkach wielość gatunków zapewnia możliwość oglądania roślin w stanie kwitnienia przez cały sezon wegetacyjny. Większość roślin to gatunki obcego pochodzenia, co może wzbudzać pewien niepokój (prof. Adam Zając i prof. Józef Mitka – informacja ustna za [5]). Rośliny obce wykorzystywane są ze względu na dekoracyjny wygląd, a w niektórych przypadkach – zwiększoną odporność na warunki panujące w mieście.

Bibliografia

- [1] Szkop Z., *Ile warte są korzyści kulturowe jakie dla mieszkańców miast świadczą drzewa?*, Zielen Miejska (Abrys), nr 172, 12.2021, <https://ekonomiadlasrodowiska.pl/kompendium-wiedzy/zielen-miejska-nr-172-12-2021/> [dostęp: 1.09.2023].
- [2] Monteiro L., Raquel Cristina, Covas D., *Water and energy efficiency assessment in urban green spaces*, Energies, 2021, vol. 14(17), nr art. 5490, <https://doi.org/10.3390/en14175490>.
- [3] Di Miceli G., Iacuzzi N., Licata M., La Bella S., Tuttolomondo T., Aprile S., *Growth and development of succulent mixtures for extensive green roofs in a Mediterranean climate*, PLoS One, 2022, vol. 17(6), nr art. e0269446, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0269446>.
- [4] Wagner A., Turki M.D., *Zastosowanie roślinności łąkowej i leśnej w zieleni miejskiej, na przykładzie Parku Krakowskiego im. Marka Grechuty w Krakowie*, [w.]: Kosmala M. (red. nauk.), *Miasta zielone – miasta przyszłości*, Towarzystwo Naukowe, Toruń 2019, s. 69–79.
- [5] Rogozik M., *Botanicy zaniepokojeni. Na łąkach kwietnych rosną gatunki inwazyjne?*, Dziennik Polski, 6.07.2017, <https://dziennikpolski24.pl/botanicy-zaniepokojeni-na-lakach-kwietnych-rosna-gatunki-inwazyjne-zdjecia/ar/12244021> [dostęp: 30.06.2019].

INTERNETOWA PLATFORMA WIEDZY NA TEMAT OCZYSZCZALNI HYDROFITOWYCH – *CONSTRUCTED WETLANDS KNOWLEDGE PLATFORM*

Tomasz Bergier¹, Mateusz Jakubiak¹, Karolina Jóźwiakowska²

¹AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Katedra Kształtowania i Ochrony Środowiska, Kraków, Polska

²Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie, Wydział Inżynierii Produkcji, Katedra Maszyn Rolniczych, Leśnych i Transportowych, Lublin, Polska

e-mail: jakubiak@agh.edu.pl

Słowa kluczowe: oczyszczanie ścieków, CWetlands, rozwiązania oparte na przyrodzie (NBS), błękitno-zielona infrastruktura (BZI), poletka hydrofitowe, ścieki

Streszczenie: Brak oczyszczania ścieków jest jedną z najistotniejszych przyczyn ciągłego ograniczania dostępu do czystej wody. Aby zmniejszyć skalę problemu, niezbędne jest rozwijanie sieci kanalizacyjnych i oczyszczalni ścieków. Jednym z rozwiązań mogących przyczynić się do ograniczenia problemu nieoczyszczonych ścieków są oczyszczalnie hydrofitowe – tzw. sztuczne mokradła (*constructed wetlands*). W rozdziale opisano internetową platformę *Constructed Wetlands Knowledge Platform* (CWetlands), która została stworzona w celu zbierania informacji jakościowych i ilościowych o oczyszczalniach hydrofitowych. CWetlands zawiera mapę z lokalizacjami i technicznymi informacjami o niemal 300 oczyszczalniach hydrofitowych z całego świata, a także szczegółowe prezentacje studiów przypadków, pokazujące technologie i możliwości zastosowania oczyszczalni w praktyce. Omówiono również szczegółowo kilka obiektów hydrofitowych, na których temat dane zawarte są w platformie CWetlands, pokazując z jednej strony różnorodność rozwiązań technicznych i konstrukcyjnych samych oczyszczalni, a z drugiej – możliwości i funkcjonalności platformy. Opisano również najważniejsze cechy platformy, między innymi możliwość rozbudowywania bazy danych o nowe obiekty przez samych użytkowników. Wytyczne, dokumentacje i materiały informacyjne udostępnione na platformie CWetlands mogą być wykorzystane w szczególności do wspierania badań, kształtowania polityk, a także wdrażania i finansowania rozwiązań przyczyniających się do realizacji idei zrównoważonego rozwoju. Założeniem projektu jest nie tylko stworzenie bazy wiedzy na temat oczyszczalni hydrofitowych, ale również podniesienie świadomości społecznej w kwestii możliwości stosowania rozwiązań opartych na procesach naturalnych oraz upowszechnienie technologii oczyszczalni roślinnych.

1. Wprowadzenie

Skuteczne i ekonomicznie efektywne oczyszczanie ścieków jest jednym z największych wyzwań cywilizacyjnych współczesnego świata. Szacuje się, że globalnie około 80% ścieków jest uwalnianych do środowiska bez oczyszczenia, co powoduje degradację zasobów wodnych oraz zagrożenia zdrowotne i społeczne. Skuteczne zmniejszenie ilości nieoczyszczanych ścieków oraz umożliwienie ich bezpiecznego ponownego wykorzystania to realizacja celów zrównoważonego rozwoju opracowanych przez Organizację Narodów Zjednoczonych (szczególnie 6.2 i 6.3) [1]. Szersze stosowanie rozwiązań błękitno-zielonej infrastruktury (BZI) i generalnie rozwiązań opartych na przyrodzie (*nature-based solutions*, NBS), w szczególności oczyszczalni hydrofitowych (*constructed wetlands*, CW) może mieć kluczowe znaczenie dla osiągnięcia tych celów. Obecnie mało wiadomo na temat wykorzystania CW do oczyszczania ścieków na świecie, niewiele lepiej jest pod tym względem w Europie, a szczególnie w Polsce czy innych krajach Europy Środkowo-Wschodniej. Tymczasem problem oczyszczania ścieków, zwłaszcza na obszarach o rozproszonej zabudowie, daleki jest od rozwiązania również w naszym kraju. Według Głównego Urzędu Statystycznego w 2021 roku niespełna 50% mieszkańców terenów wiejskich było podłączonych do oczyszczalni ścieków komunalnych [2]. W ostatnich latach zanotowaliśmy ogromny postęp w tym zakresie – dla porównania w 2000 roku wskaźnik ten nieznacznie przekraczał 10% [2]. Jednak wciąż potrzeby są bardzo duże, a konwencjonalny model polegający na budowie kanalizacji zbiorczej i odprowadzeniu ścieków do centralnej oczyszczalni nie jest możliwy do zastosowania w wielu obszarach o nieregulowanej gospodarce ścieków. Niezbędne jest szukanie alternatywnych rozwiązań, które zapewniłyby skuteczne, ekonomicznie racjonalne i niezawodne oczyszczanie ścieków, zwłaszcza na obszarach, gdzie budowa kanalizacji zbiorczej jest bardzo kosztowna lub wręcz technicznie niemożliwa ze względu na duże odległości pomiędzy gospodarstwami, niekorzystną topografię, złożone warunki własnościowe czy inne czynniki.

Rozwiązaniem, które mogłoby być z powodzeniem wykorzystywane do poradzenia sobie z problemami opisanymi powyżej, a którego potencjał jest zupełnie niewykorzystywany w Polsce, są niewątpliwie oczyszczalnie hydrofitowe. Mają one niskie wymagania dotyczące obsługi i konserwacji w porównaniu z innymi technologiami, a co szczególnie cenne na obszarach wiejskich i o rozproszonej zabudowie – są wytrzymałe na znaczne wahania ilości i jakości dopływających ścieków [3]. Dzięki temu, że hydrofitowe oczyszczalnie ścieków wykorzystują naturalne procesy, ich stosowanie nie wiąże się z koniecznością używania produktów chemicznych, a zużycie energii elektrycznej jest znacznie niższe niż w przypadku konwencjonalnych rozwiązań [4], co jest szczególnie istotne w kontekście zmiany klimatycznej i kryzysu energetycznego [5]. Oprócz swojej podstawowej funkcji, czyli oczyszczania ścieków, oczyszczalnie hydrofitowe dostarczają wielu usług ekosystemowych, przyczyniając się do zwiększenia bioróżnorodności, umożliwiając retencję i recyrkulację ścieków, poprawiając lokalne warunki mikroklimatyczne, a także estetykę otoczenia [6, 7]. To wszystko sprawia, że są skuteczną i atrakcyjną alternatywą względem konwencjonalnego modelu usuwania i oczyszczania ścieków, szczególnie w przypadku małych miejscowości (poniżej 5000 RLM) [6, 7].

Zasadniczą barierą dla popularyzacji i szerszego stosowania oczyszczalni hydrofitowych, poza niską świadomością decydentów i projektantów, jest brak spójnych i uniwersal-

nych zasad projektowania tego typu obiektów [8], a także szczegółowo udokumentowanych i opisanych dobrych przykładów, mogących stanowić inspirację dla projektantów i inwestorów oraz źródło rozwiązań technicznych do zaadaptowania do lokalnych potrzeb i uwarunkowań. W celu wypełnienia tej luki stworzono internetową platformę wiedzy na temat oczyszczalni hydrofitowych *Constructed Wetlands Knowledge Platform* (CWetlands), którą szczegółowo opisano w niniejszym rozdziale, a której zasadniczym celem jest gromadzenie rozbudowanego zestawu danych i informacji o oczyszczalniach hydrofitowych z całego świata. Omówiono najważniejsze cechy platformy, w tym możliwość samodzielnego rozbudowywania bazy danych o nowe obiekty przez samych użytkowników. Zaprezentowano również i przeanalizowano obecne zasoby platformy, omawiając jej zawartość, w szczególności liczebność rekordów. Przeprowadzono analizy statystyczne zasobów pod kątem krajów, w których znajdują się oczyszczalnie, rodzajów rozwiązań ścieków, wielkości obiektów, ich typu, stosowanych rozwiązań technicznych i materiałów konstrukcyjnych. Pozwala to z jednej strony poznać obecną sytuację i stopień rozwoju technologii na świecie, z drugiej – pokazać potencjał platformy CWetlands w zakresie udostępniania szczegółów technicznych, kluczowych dla projektowania oczyszczalni hydrofitowych. Opisano również szczegółowo trzy obiekty hydrofitowe, na których temat dane umieszczone są na platformie CWetlands, pokazując z jednej strony różnorodność rozwiązań technicznych i konstrukcyjnych samych oczyszczalni, a z drugiej – możliwości i funkcjonalności platformy.

2. Internetowa platforma wiedzy na temat oczyszczalni hydrofitowych CWetlands

Constructed Wetlands Knowledge Platform (CWetlands) to ogólnodostępna platforma internetowa (<https://data.cwetlandsdata.com>), gromadząca i udostępniająca wiedzę na temat oczyszczalni hydrofitowych, zawierająca bazę danych oraz internetowy system informacji geograficznej (WebGIS). Została ona stworzona w ramach projektu „Towards the ‘Constructed Wetlands Knowledge Platform’ for sustainable development” (CWetlands Data). Jest to wizualna i przyjazna dla użytkownika platforma z dynamicznymi mapami oraz intuicyjnym interfejsem użytkownika. Zawiera także statystyki odnoszące się do kluczowych danych w formacie interaktywnym, a także wytyczne i dokumentację dotyczącą oczyszczalni hydrofitowych oraz łączy do informacji i zasobów edukacyjnych. W odniesieniu do każdego obiektu hydrofitowego można zarejestrować do 134 różnych parametrów pogrupowanych w formie 14 tabel, co pozwala na wyciągnięcie szczegółowych wniosków na temat konstrukcji i efektywności działania. Poza tym zawartość bazy danych można przeglądać i analizować przekrojowo, użytkownik ma do dyspozycji dwa mechanizmy: (1) interaktywną mapę i (2) narzędzia do obliczeń statystycznych. Mapy i statystyki wyświetlają dane dynamicznie, z uwzględnieniem filtrów, które użytkownicy mogą dostosować do swoich potrzeb. Wyniki obliczeń statystycznych wyświetlane są także w formie wykresów, które również można pobrać. Platforma CWetlands zawiera dodatkowe materiały edukacyjne, a także wytyczne projektowe i artykuły dotyczące oczyszczalni hydrofitowych. Platforma ma wersję angielską i hiszpańską. Użytkownicy mogą kontaktować się ze sobą za pomocą wewnętrznej poczty. Wszystkie te funkcje sprawiają, że platforma jest interaktywna i łatwa w użyciu.

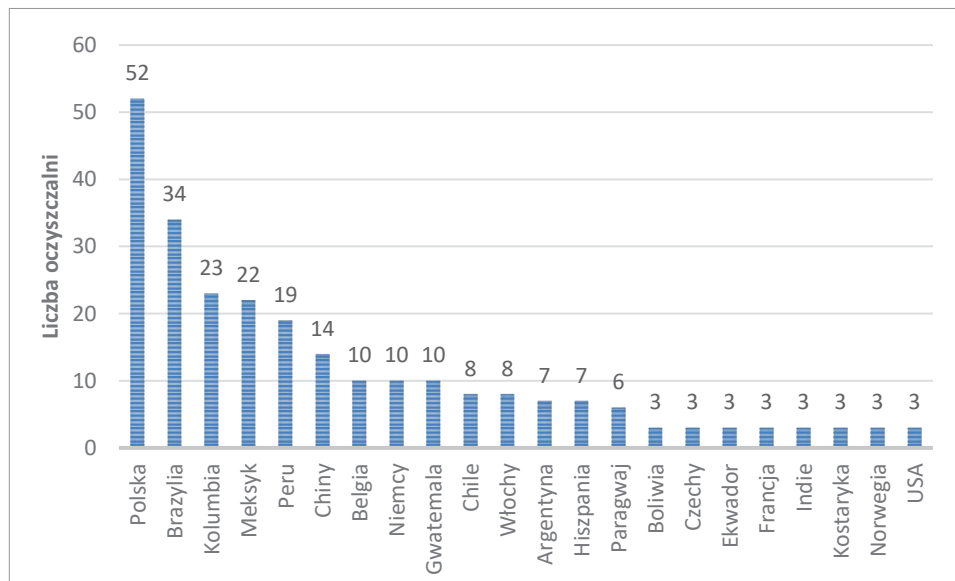
Formularz wprowadzania danych do bazy platformy CWetlands zawiera zarówno pola, które należy obligatoryjnie uzupełnić podstawowymi danymi o oczyszczalni, jak i pola, w których podanie informacji nie jest obowiązkowe. Wprowadzając oczyszczalnię do bazy, należy podać kraj, wskazać lokalizację oczyszczalni na mapie oraz sprecyzować rodzaj ścieków doprowadzanych do oczyszczalni zgodnie z przyjętą w platformie klasyfikacją. Dodatkowo wymagane jest podanie sumarycznej powierzchni poletek oczyszczalni hydrofitowej, informacji, czy jest to oczyszczalnia eksperymentalna/pilotażowa, czy też o skali technicznej, oraz średniego, dobowego dopływu ścieków do oczyszczalni.

Ze względu na bardzo szeroki zakres danych o oczyszczalniach hydrofitowych pozostałe informacje nie są obligatoryjne. Oczywiście wskazane jest podanie możliwie pełnej i szerokiej informacji, jednak w przypadku niektórych oczyszczalni część danych jest trudna do pozyskania lub mogą one nie być dostępne dla osób wprowadzających obiekt do bazy. Pola, które nie są obligatoryjne, odnoszą się między innymi do klimatu (średniej rocznej temperatury i średnich rocznych opadów minimum z 10 ostatnich lat) oraz publikacji naukowych dotyczących wprowadzanej do bazy oczyszczalni. Obligatoryjna nie jest również część danych technicznych o oczyszczalni, np. zastosowany materiał konstrukcyjny, materiał filtrujący, informacja o sposobie wstępnego oczyszczania ścieków, liczbie etapów oczyszczania, typie poletek hydrofitowych, gatunkach zastosowanej roślinności, sposobie wykorzystania oczyszczonych ścieków czy roku oddania oczyszczalni do eksploatacji. Baza zawiera również informacje dotyczące kosztów budowy oczyszczalni oraz kosztów eksploatacyjnych. W celu ujednolicenia dane finansowe w bazie podawane są w dolarach amerykańskich (USD). Baza umożliwia opisanie każdego poletka hydrofitowego osobno ze wskazaniem, czy zastosowano rozwiązanie z wolną powierzchnią wody, poziomym przepływem podpowierzchniowy czy też pionowym przepływem. Użytkownik wprowadzający oczyszczalnię do bazy może również podać wartości badanych parametrów dotyczące zarówno dopływu, jak i odpływu z oczyszczalni. Podstawowe parametry uwzględnione w bazie obejmują: biochemiczne zapotrzebowanie na tlen (BZT_5), chemiczne zapotrzebowanie na tlen ($ChZT$), zawiesinę ogólną, azot ogólny (N_{og}), azot amonowy (NH_4-N), azot azotanowy (NO_3-N), fosfor ogólny (P_{og}), bakterię *Escherichia coli*, bakterie z grupy coli typu kałowego. Przy parametrach jakościowych możliwe jest także wskazanie dat rozpoczęcia i zakończenia pomiarów, typu wartości (raportowanej lub obliczonej), a także metody i normy, zgodnie z którymi wykonano analizę.

3. Informacje o oczyszczalniach hydrofitowych zgromadzone w bazie platformy CWetlands

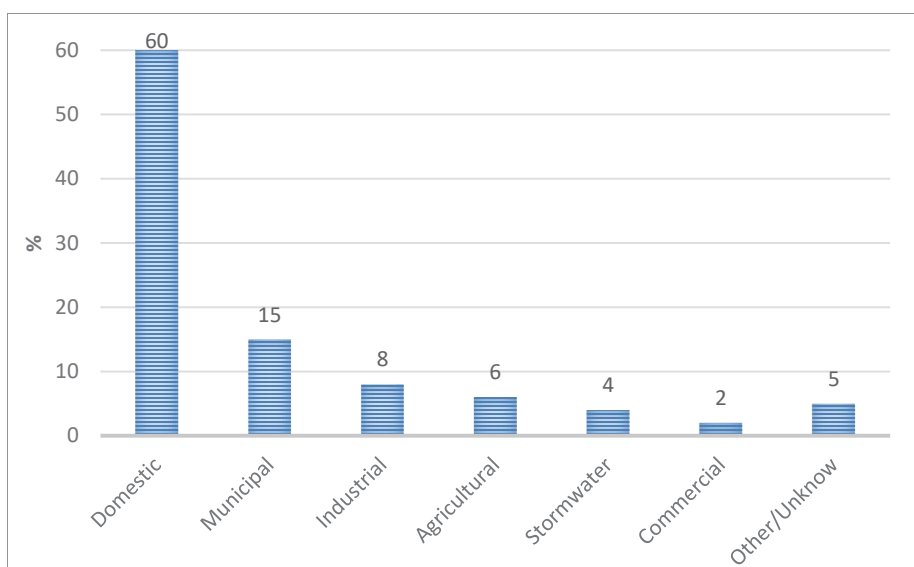
Mimo że projekt realizowany był przez zespół reprezentujący ośrodki naukowe z pięciu krajów, zasięg platformy CWetlands jest globalny. Do września 2023 roku baza projektu obejmowała 287 oczyszczalni hydrofitowych z całego świata. Najliczniej reprezentowane w bazie są oczyszczalnie z Europy (111 obiekty). Krajem z największą liczbą wprowadzonych do bazy oczyszczalni jest Polska (rys. 1). Równie liczną grupę stanowią oczyszczalnie z Ameryki Południowej (105 obiektów). Ameryka Północna reprezentowana jest w bazie przez 39 oczyszczalni, następne są Azja (26 obiekty), Afryka (5 obiektów) i Australia.

lia (1 obiekt). Aktualne wpisy do bazy danych nie odzwierciedlają faktycznej liczby oczyszczalni w poszczególnych krajach i przyjmuje się, że baza będzie rozbudowywana również po zakończeniu projektu



Rys. 1. Kraje z największą liczbą oczyszczalni hydrofitowych odnotowanych na platformie CWetlands

Wszystkie wprowadzone do platformy CWetlands obiekty mają wskazane źródła ścieków poddawanych oczyszczaniu. W platformie założono klasyfikację ścieków z podziałem na sześć zdefiniowanych kategorii. Ponad 60% oczyszczalni hydrofitowych umieszczonych w bazie przyjmuje ścieki skategoryzowane jako „domestic” (rys. 2). Kategoria ta obejmuje ścieki fekalne, szarą wodę i inne ścieki pochodzące z zabudowy mieszkaniowej. Druga pod względem liczebności kategoria (15%) obejmuje ścieki pochodzące ze źródeł domowych, przemysłowych, komercyjnych i instytucjonalnych we wskazanej miejscowości i jest określona w bazie jako „municipal”. Zrzuty wody po jej wykorzystaniu lub pozyskaniu w procesach przemysłowych lub energetycznych skategoryzowane są jako „industrial” i oczyszczane przez 8% obiektów wprowadzonych do bazy. Kolejne kategorie ścieków są reprezentowane mniej licznie. Należą do nich kategoria „agricultural” (6%) obejmująca ścieki z pól uprawnych, które nie infiltrują do gleby i spływają po powierzchni, kategoria „stormwater” (4%) obejmująca spływ wody deszczowej i innych opadów (np. śniegu) na obszarach miejskich oraz kategoria „commercial” (2%) – ścieki z placówek handlowych lub instytucji, w tym szpitali. Jeśli ścieki pochodzą z innego źródła niż wymienione w podstawowych kategoriach, istnieje możliwość wyboru opcji „other” i opisanie pochodzenia ścieków. W większości przypadków w tej kategorii podawane są ścieki pochodzące z hodowli ryb, krów lub trzody chlewnej. Oczyszczalnie, w przypadku których wprowadzający wpisy nie byli w stanie podać źródła pochodzenia ścieków, stanowią mniej niż 2% i sklasyfikowane są jako „unknown”.



Rys. 2. Rodzaje ścieków doprowadzanych do oczyszczalni znajdujących się na platformie CWetlands

Nie wszystkie z wprowadzonych do bazy oczyszczalni mają podaną informację o charakterze instalacji. Platforma daje możliwość zadeklarowania, czy oczyszczalnia ma charakter eksperymentalny/badawczy/pilotażowy czy też jest to inwestycja w skali technicznej. Spośród zadeklarowanych powyższych dwóch rodzajów oczyszczalni przeważają oczyszczalnie w skali technicznej (57%). Takie oczyszczalnie dominują wśród zgłoszonych europejskich obiektów (ponad 90%). Przeciwnie sytuacja wygląda wśród oczyszczalni zgłoszonych z obu Ameryk, gdzie dominują obiekty sklasyfikowane jako „eksperymentalne/badawcze/pilotażowe”. Szczególnie widoczna dominacja oczyszczalni o takim charakterze jest w Brazylii (85%), Kolumbii (78%) czy Meksyku (77%). W krajach tych oczyszczanie ścieków było przez długi czas tematem zaniedbanym. Oczyszczalnie hydrofitowe stanowią stosunkowo racjonalną kosztowo alternatywę wobec dużych, konwencjonalnych systemów zbierania i oczyszczania ścieków. Dlatego w tym rejonie prowadzone są intensywne prace zarówno badawcze, jak i wdrożeniowe nad różnymi wariantami technologii hydrofitowych, możliwymi do zastosowania gatunkami roślin i dostosowaniem instalacji do panujących warunków klimatycznych.

Wielkość oczyszczalni wyrażona sumaryczną powierzchnią poletek hydrofitowych jest bardzo zróżnicowana. W zależności od charakteru, konstrukcji i przeznaczenia oczyszczalni oraz od rodzaju i ilości doprowadzanych ścieków w bazie znajdują się oczyszczalnie z poletkami wielkości od kilku–kilkudziesięciu aż do kilku tysięcy metrów kwadratowych. Podobnie kształtuje się kwestia ilości ścieków doprowadzanych do oczyszczania. Wiele oczyszczalni ma codzienne dopływy nieprzekraczające 1 m³. W bazie znajdują się również instalacje, których dopływy codzienne przekraczają 100 m³ (33 obiekty). Wśród nich jest 12 instalacji z dopływami przekraczającymi 1000 m³.

Wprowadzone do bazy informacje o liczbie poletek hydrofitowych oczyszczalni wskazują, że najpopularniejszym rozwiązaniem (50% obiektów) jest oczyszczanie jednostopnio-

we (tab. 1). W większości przypadków stosowane jest w nich złożę z poziomym przepływem podpowierzchniowym. Nieco mniej liczną grupę obiektów (31%) zawartych w bazie stanowią oczyszczalnie z dwustopniowym systemem oczyszczania, gdzie najczęściej stosowana jest kombinacja dwóch typów poletek: z poziomym przepływem podpowierzchniowym i pionowym przepływem podpowierzchniowym. Oczyszczalnie mające wielostopniowy system oczyszczania stanowią 19% obiektów zawartych w bazie. Najczęściej rozbudowany, wielostopniowy system oparty jest na kaskadowych poletkach z wolną powierzchnią wody lub kombinacji kilku poletek z przepływem podpowierzchniowym poziomym i pionowym.

Tabela 1. Zestawienie rodzajów oczyszczalni wprowadzonych do platformy CWetlands ze wskazaniem liczby stopni oczyszczania oraz typu zastosowanych poletek hydrofitowych

Oczyszczanie jednostopniowe [%]		Oczyszczanie dwustopniowe [%]		Oczyszczanie wielostopniowe [%]	
50		31		19	
HF	42	HF-VF	16	FWS	9
VF	7	VF-VF	13	HF-VF	5
FWS	1	VF-FWS	2	HF-VF-FWS	2
				Inne	3

HF – poziomy przepływ podpowierzchniowy, VF – pionowy przepływ podpowierzchniowy, FWS – wolna powierzchnia wody.

Jak wynika z informacji wprowadzonych do bazy, materiałem użytym przy budowie większości oczyszczalni hydrofitowych jest cement i membrana z tworzywa sztucznego będąca warstwą hydroizolacyjną. Rzadziej oczyszczalnie mają konstrukcję ziemną. Materiał wypełniający poletka hydrofitowe oczyszczalni to głównie żwir (31%), mieszanka piachu i żwiru (19%) lub piach, najczęściej gruboziarnisty (17%). Ze względu na specyfikę regionu w Meksyku najczęstszym wypełnieniem poletek są porowate skały wulkaniczne takie jak tezontle czy tepezil. Tezontle jest silnie utlenioną skałą wulkaniczną o czerwonym kolorze spowodowanym zawartością tlenku żelaza. W Meksyku jest to materiał szeroko stosowany w budownictwie, a także w ogrodnictwie czy akwarystyce. Natomiast tepazil jest bardzo trwałą skałą powstałą z piany wulkanicznej. Stosowany jest w rolnictwie, gdyż charakteryzuje się wysokim zatrzymywaniem wilgoci i ułatwia dotlenienie gleby dzięki swojej porowatości. Inne, rzadziej stosowane, wypełnienia poletek w oczyszczalniach to różnego rodzaju mieszanki zawierające między innymi dodatki ziemi, zrębków drzewnych, keramzytu, pokruszonych muszli małży, w tym ostryg, mech torfowiec czy PCV.

Dobór odpowiednich gatunków roślin do oczyszczalni hydrofitowej zależy zarówno od rodzaju doprowadzanych ścieków, jak i strefy klimatycznej, w której oczyszczalnia ma pracować. Często istotnym aspektem przy doborze kompozycji roślin jest funkcja estetyzacji krajobrazu, którą może pełnić oczyszczalnia hydrofitowa. We wprowadzonych do bazy oczyszczalniach można wyróżnić ponad 50 gatunków roślin występujących w kompozycjach wielogatunkowych lub jednogatunkowych. W większości (63%) oczyszczalnie są obsadzone jednym gatunkiem roślin. W układzie jednogatunkowym najczęściej stosuje się trzinę pospolitą (*Phragmites australis*), pałki – głównie pałkę szerokolistną (*Typha*

latifolia), rzadziej pałkę południową (*Typha domingensis*) oraz rośliny z rodzaju cibora – ciborę zmienną (*Cyperus alternifolius*) i ciborę papirusową (*Cyperus papyrus*). W jednogatunkowych oczyszczalniach również sadi się rośliny z rodzaju helikonia, np. helikonie papuzią (*Heliconia psittacorum*) czy helikonie dziobatą (*Heliconia rostrata*), różne odmiany kolorystyczne paciorecznika indyjskiego (*Canna indica*), oczeret amerykański (*Schoenoplectus americanus*) i kalifornijski (*Schoenoplectus californicus*) czy niezwykle szybko rosnący hiacynt wodny (*Eichhornia crassipes*). Oczyszczalnie dwugatunkowe stanowią 21% obiektów w bazie. W takim układzie najczęściej dwa gatunki sadzone są osobno na kolejnych poletkach hydrofitowych. W obiektach dwugatunkowych najczęściej sadzona jest trzcina pospolita, pałki, wierzba wiciowa (*Salix viminalis*), cibory i paciorecznik indyjski. Oczyszczalnie obsadzone więcej niż dwoma gatunkami roślin stanowią 16% obiektów w bazie i w nich również najczęściej stosowana jest trzcina, ale także pacioreczniki, pałki i helikonie.

4. Wybrane studia przypadków zamieszczone na platformie CWetlands

Platforma CWetlands poza mapą i kartami szczegółowych opisów poszczególnych obiektów zawiera również podstronę przedstawiającą najbardziej interesujące zastosowania oczyszczalni hydrofitowych w różnych stronach świata. Studia przypadków zawierają bardziej szczegółowe opisy wybranych oczyszczalni, a także dokumentację fotograficzną (często z różnych etapów budowy i funkcjonowania obiektu) oraz informacje projektowe.

4.1. Oczyszczalnia hydrofitowa UNACEM, Peru, Lima

Znajdująca się w miejscowości Villa María del Triunfo (prowincja Lima) oczyszczalnia hydrofitowa działa od 2010 roku. Została wybudowana przez przedsiębiorstwo zajmujące się produkcją cementu i klinkieru – Company Unión Andina de Cementos S.A.A. (UNACEM) – w celu oczyszczania ścieków bytowych z gospodarstw domowych oraz ścieków przemysłowych. Dodatkowym celem inwestycji było uzyskanie ścieków o czystości umożliwiającej wykorzystanie ich do nawadniania. Prace pilotażowe poprzedzające wybudowanie oczyszczalni hydrofitowej firma rozpoczęła w 2005 roku, cztery lata później rozpoczęto budowę oczyszczalni i systemu kanalizacji doprowadzającej ścieki do oczyszczalni. Projekt zakłada trzyetapowy system oczyszczania ścieków:

1. oczyszczanie mechaniczne (komora krat, miernik Parshalla, zbiornik regulacyjny);
2. oczyszczanie wstępne (zbiornik flokulacyjny, osadnik laminarny, zbiornik napowietrzający);
3. oczyszczanie wtórne (złożo gruntowo-roślinne z poziomym przepływem podpowierzchniowym).

Na elementy oczyszczalni składają się również: prasa filtracyjna do odwadniania osadu, instalacja do dezynfekcji chlorem, filtry samoczyszczące oraz instalacja do magazynowania i dystrybucji oczyszczonych ścieków.

Złoże gruntowo-roślinne składa się z sześciu poletek z wypełnieniem żwirowym, każde o powierzchni 900 m² (30 m × 30 m) i głębokości 0,6 m. Do obsadzenia złóż wykorzystano dwa gatunki roślin: paciorecznik indyjski (*Canna indica*) i ciborę zmienną (*Cyperus alternifolius*) (rys. 3). Oba gatunki charakteryzują się szybkim wzrostem, są umiarkowanie ekspansywne i preferują tereny podmokłe. Dobór roślin pozwolił zintegrować oczyszczalnię ścieków z lokalnym krajobrazem, a także stworzyć kolorowy ogród dzięki żółtym i czerwonym kwiatom zastosowanych odmian paciorecznika.

Całkowity przepływ oczyszczalni wynosi 600 m³ na dobę (6,94 dm³/s). Skuteczność oczyszczania przekracza 95%, średni poziom BZT w oczyszczonych ściekach wynosi poniżej 10 mg/dm³. Ścieki są wykorzystywane do nawadniania parków i ogrodów oraz do zasilania systemu przeciwpożarowego. Oczyszczalnia zasilana jest energią elektryczną dostarczaną z Krajowego Połączonego Systemu Elektrycznego (SEIN). Dostawcą energii jest firma „El Platanal” – operator elektrowni wodnych. Cała instalacja zajmuje obszar o powierzchni 25 000 m². Dzięki wybudowaniu oczyszczalni roczne oszczędności w zużyciu wody przekraczają 110 000 m³. Natomiast całkowity roczny koszt utrzymania oczyszczalni wynosi 120 000 USD.



Rys. 3. Oczyszczalnia hydrofitowa z poletkami żwirowymi obsadzonymi paciorecznikiem indyjskim (*Canna indica*) i ciborą zmienną (*Cyperus alternifolius*). Przedsiębiorstwo UNACEM, Lima, Peru (cwetlandsdata.com, dostęp: 1.01.2023)

4.2. Oczyszczalnia Sistema Humedal Artificial Doble Espiral (SHADE), Meksyk, miasto Meksyk (Ciudad de México)

Oczyszczalnia została wybudowana w 2020 roku w miejskim parku Bosque de San Juan de Aragón, w mieście Meksyk (Ciudad de México). Główną atrakcją parku, który rocznie odwiedza ponad cztery miliony osób, jest staw zasilany ściekami z miejskiej, konwencjonalnej oczyszczalni. Celem inwestycji było stworzenie systemu umożliwiającego usunięcie ze stawu biogenów i zminimalizowanie eutrofizacji stawu. Oczyszczalnia tworząca system podwójnej spirali sztucznych mokradeł oficjalnie otrzymała nazwę SHADE (akronim od nazwy projektu „Sistema Humedal Artificial Doble Espiral”), jednak popularnie określana jest „Humedal de Caracol”, co oznacza „ślimacze mokradła” (rys. 4). Projektanci założyli, że taki kształt nie tylko wpłynie na atrakcyjność architektoniczną oczyszczalni, ale geometria spirali pozwoli na oczyszczanie większej ilości wody na mniejszej powierzchni. Przy projektowaniu czerpano inspiracje również z dziedzictwa kulturowego regionu. Dla starożytnych mieszkańców Meksyku spirala była symbolem wody i ruchu. Konstrukcja oczyszczalni zbudowana jest z żelbetu, dodatkowo użyto drewna i stali ocynkowanej. Komory oczyszczalni uszczelnione zostały membraną zapobiegającą wyciekom i wypełnione żwirem oraz grysem o różnych średnicach.



Rys. 4. Oczyszczalnia Sistema Humedal Artificial Doble Espiral (SHADE), miasto Meksyk (Ciudad de México)
(cwetlandsdata.com, dostęp: 1.01.2023)

Powierzchnia całkowita oczyszczalni wynosi 3108 m² (usuwanie fosforanów 270 m², podpowierzchniowe tereny podmokłe 1025 m², powierzchniowe tereny podmokłe 337 m², stabilizacja 168 m², przelew i studzienka 85 m², chodniki 1223 m²). Po uruchomieniu oczyszczalnia odbierała 100 m³ na dobę. Założono, że w miarę stabilizacji biologicznej dopływ będzie stopniowo zwiększany, aż do docelowej wydajności oczyszczania wynoszącej 140 m³ na dobę. Dopływająca do oczyszczalni woda jest pompowana do najwyższego punktu systemu, skąd dalszy przepływ odbywa się grawitacyjnie. Poszczególne komory w spirali zostały tak zaprojektowane, aby pozwalały na etapowe usuwanie związków węglowych, fosforowych i azotowych. Proces odbywa się etapami, z przepływem pionowym i poziomym. W celu usunięcia związków fosforu woda przepływa przez filtr z wypełnieniem wapiennym. Na kolejnych etapach mokradłowych zachodzi degradacja związków węglowych i nitrifikacja. Na poletkach hydrofitowych zastosowano trzcinę, pałkę, paciorecznik i ciborę.

Ponieważ celem budowy oczyszczalni było zmniejszenie stopnia eutrofizacji stawu parkowego, została ona tak zaprojektowana, aby oczyszczona woda po przepłynięciu przez ustabilizowaną oczyszczalnię miała stężenia azotu i fosforu poniżej 1 mg/dm³. Oczyszczalnia nie tylko przynosi korzyści polegające na oczyszczaniu wody ze stawu, ale również wpływa na zwiększenie bioróżnorodności i atrakcyjność parku oraz jest obiektem wykorzystywanym do edukacji ekologicznej.

4.3. Hybrydowa hydrofitowa oczyszczalnia ścieków, Poleski Park Narodowy, Polska

Hybrydowa hydrofitowa oczyszczalnia ścieków w kształcie żółwia przy Ośrodku Dydaktyczno-Muzealnym Poleskiego Parku Narodowego w Starym Załuczu została wybudowana w 2015 roku i zaprojektowana na średnią dobową przepustowość 1 m³/d (rys. 5). Obiekt służy do oczyszczania ścieków bytowych wytwarzanych przez pracowników i turystów odwiedzających ośrodek.

Oczyszczalnia została zaprojektowana w kształcie żółwia. Żółw błotny to gatunek reliktowy, a Poleski Park Narodowy to jedno z nielicznych siedlisk tego zagrożonego wyginięciem gada. Ze względu na swój specyficzny kształt oczyszczalnia przykuwa uwagę i stwarza możliwość łączenia skutecznego oczyszczania ścieków bytowych ze zwiększaniem świadomości ekologicznej zarówno na temat bioróżnorodności, konieczności ochrony gatunków zagrożonych, jak i zrównoważonej sanitacji. W tym atrakcyjnym kształcie kryje się zaawansowana konstrukcja stanowiąca połączenie złożeń hydrofitowych o różnym przepływie ścieków oraz urządzeń konwencjonalnych.

Wielkość obiektu to 100 m². Jest to oczyszczalnia hydrofitowa hybrydowa typu VF-HF (jedno złożo VF o powierzchni 42,4 m² oraz cztery złoża HF – każde o powierzchni 13,8 m²). W pierwszej części oczyszczalni następuje mechaniczne oczyszczanie ścieków w osadniku wstępnym zintegrowanym z instalacją do odwadniania osadów. Osadnik ma postać prostopadłościennego zbiornika betonowego. Zapewnia usuwanie ze ścieków zanieczyszczeń stałych dzięki procesom sedymentacji, flotacji i fermentacji. W drugiej części ścieki są oczyszczane metodą biologiczną w systemie złożeń gruntowo-roślinnych. Pierwsze złożo obsadzone manną mielec (*Glyceria maxima*) ma pionowy przepływ ścieków (VF). Kolejne cztery złoża gruntowo-roślinne obsadzone trzciną pospolitą (*Phragmites australis*) cechują się podpowierzchniowym poziomym przepływem ścieków (HF). Na ostatnim etapie zachodzi usuwanie fosforu ze ścieków w specjalnym P-filtrze za pomocą skały węglanowo-krzemionkowej (opoki).

tet Przyrodniczy w Lublinie), pozwalająca unieszkodliwiać osady w miejscu ich powstania, a zatem bez potrzeby ich częstego wywozu. Instalacja ta zbudowana jest z betonowej komory, wewnątrz której umieszczony jest kosz z profili stalowych z czterema workami odwadniającymi. Proces odwadniania osadów polega na wielokrotnym napełnianiu worków surowym osadem i odprowadzeniu odcieków do osadnika wstępnego. Worki wypełnione odwodnionym osadem są przechowywane w komorze odwadniania przez kilka miesięcy, a następnie po wykonaniu badań sanitarnych osad może być wykorzystany np. do celów rolniczych [9, 10]. Dotychczasowe badania wykazały, że hybrydowa hydrofitowa oczyszczalnia ścieków w Poleskim Parku Narodowym jest bardzo efektywna w usuwaniu zarówno zanieczyszczeń organicznych wyrażonych wskaźnikami BZT₅ – 99% i ChZT – 95%, zawiesiny ogólnej – 88%, jak i zanieczyszczeń biogennych (azotu i fosforu): N_{og} – 59% i P_{og} – 99% [11].

5. Podsumowanie

Oczyszczalnie hydrofitowe są obiecującym alternatywnym rozwiązaniem względem konwencjonalnych oczyszczalni ścieków, respektującym zasady zrównoważonego rozwoju oraz adaptacji do skutków zmian klimatu i ich mitygacji, a także wymogi szeroko rozumianej ochrony środowiska przyrodniczego. Ich zastosowanie ma sens nie tylko w krajach rozwijających się o nieuporządkowanej sanitacji [12], lecz również w krajach rozwiniętych, w tym w Polsce, zwłaszcza na obszarach o rozproszonej zabudowie i/lub trudnej topografii, w miejscach położonych w dużej odległości od osad ludzkich, na terenach parków narodowych i innych obszarach cennych przyrodniczo.

Pomimo rozwoju wiedzy na temat efektywności i funkcjonowania oczyszczalni hydrofitowych oraz dobrych przykładów ich stosowania z Polski i ze świata wciąż są one rozwiązaniem niszowym, rzadko stosowanym. Niezbędne jest popularyzowanie i informowanie potencjalnych użytkowników o ich sposobie funkcjonowania, skuteczności usuwania zanieczyszczeń, a wreszcie cechach użytkowych decydujących o ich atrakcyjności. Szczególnie istotne jest gromadzenie i udostępnianie fachowej wiedzy na temat rozwiązań konstrukcyjnych, stosowanych materiałów i gatunków roślin, a wreszcie – ich skuteczności w usuwaniu kluczowych zanieczyszczeń wpływających na parametry jakości wody i ścieków. Tylko dzięki dostępowi do różnorodnej, solidnej wiedzy technicznej dotyczącej parametrów projektowych potencjalni inwestorzy i decydenci będą mogli podjąć świadomą decyzję o ewentualnym zastosowaniu oczyszczalni hydrofitowej do oczyszczania ścieków w ich gminie czy obiekcie, a przede wszystkim będą mieli możliwość jej prawidłowego zaprojektowania. Niewątpliwie opisana w rozdziale platforma *Constructed Wetland Knowledge Platform* (CWetlands) może spełnić to zadanie. Jak wykazano w rozdziale *Wybrane studia przypadków zamieszczone na platformie CWetlands*, platforma może stanowić źródło inspirujących przykładów i danych o najlepszych praktykach, a także swego rodzaju poradnik po świecie oczyszczalni hydrofitowych, które – wbrew obiegowym opiniom o ich prostocie – dynamicznie się rozwijają (pojawiają się nowe rozwiązania konstrukcyjne i funkcjonalne). Statystyczne podsumowanie informacji zgromadzonych w bazie platformy CWetlands wskazuje na dużą różnorodność oczyszczanych ścieków, typów poletek, rodzajów zastosowanych wypełnień, a także wykorzystanych gatunków roślin. Baza

zawiera oczyszczalnie hydrofitowe funkcjonujące w różnych strefach klimatycznych na całym świecie. Dominują oczyszczalnie w skali technicznej, z dopływem ścieków z zabudowy mieszkaniowej, o bardzo zróżnicowanym przepływie i wielkości poletek hydrofitowych. Najpopularniejszym rozwiązaniem są oczyszczalnie jednoetapowe z poziomym przepływem podpowierzchniowym. Wypełnienie poletek najczęściej stanowi żwir lub mieszanina piasku i żwiru, a obsadę roślinną tworzą w przeważającej większości trzcina pospolita, pałki, wierzba wiciowa, cibory i ogrodowe odmiany paciorecznika indyjskiego. Informacje zawarte w bazie pokazują potencjał platformy CWetlands jako narzędzia pogłębionych analiz oraz szukania zależności, którym podlegają obiekty hydrofitowe. Oczywiście platforma jest w fazie rozwoju, liczba rekordów w jej bazie danych jest ograniczona, a część z nich niekompletna. Aby narzędzie to osiągnęło pełnię możliwości, niezbędna jest jego popularyzacja oraz pozyskanie nowych użytkowników, zwłaszcza tych, którzy dysponują danymi na temat oczyszczalni i zechcą się nimi podzielić, wpisując je do bazy platformy.

Bibliografia

- [1] *Przekształcamy nasz świat: Agenda na rzecz zrównoważonego rozwoju 2030*, ONZ, 2015, https://www.un.org.un.org.pl/files/164/Agenda%202030_pl_2016_ostateczna.pdf [dostęp: 1.09.2023].
- [2] *Ochrona środowiska 2022*, Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2022, <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/srodowisko-energia/srodowisko/ochrona-srodowiska-2022,1,23.html> [dostęp: 1.09.2023].
- [3] Kharwade A., Rathod V.E., Makde A.J., Badodekar K.A., Raut C.M., Meshram S.D., Sakhare N.B., *Constructed wetland for domestic wastewater treatment: A review*, International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology, 2021, vol. 10(5), s. 7569–7575.
- [4] Gorgoglione A., Torretta V., *Sustainable management and successful application of constructed wetlands: A critical review*, Sustainability, 2018, vol. 10(11), nr art. 3910, <https://doi.org/10.3390/su10113910>.
- [5] Bergier T., Włodyka-Bergier A., *Pot experiments on the influence of reed Phragmites Australis on an efficiency of N-alkanes removal from model stormwater*, Polish Journal of Environmental Studies, 2017, vol. 26(5A), s. 3–7.
- [6] de la Varga D., Soto M., Arias C.A., van Oirschot D., Kilian R., Pascual A., Álvarez J.A., *Constructed wetlands for industrial wastewater treatment and removal of nutrient*, [w:] Val del Río Á., Campos Gómez J.L., Mosquera Corral A. (eds.), *Technologies for the Treatment and Recovery of Nutrients from Industrial Wastewater*, IGI Global, Hershey 2017, s. 202–227, <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-1037-6.ch008>.
- [7] Bergier T., Kowalewska A. (eds.), *Addressing Climate Change in Cities – Catalogue of Urban Nature-Based Solutions*, Ecologic Institute, Sendzimir Foundation, Berlin – Krakow 2019.
- [8] Dotro G., Langergraber G., Molle P., Nivala J., Piugagut J., Stein O., von Sperling M., *Treatment Wetlands*, IWA Publishing, London 2017.

-
- [9] Józwiakowski K., Gajewska M., Marzec M., Gizińska-Górna M., Pytka A., Kowalczyk-Juśko A., Sosnowska B., Baran S., Malik A., Kufel R., *Hybrid constructed wetlands for the National Parks – a case study, requirements, dimensioning, preliminary results*, [w:] Vymazal J. (ed.), *Natural and Constructed Wetlands: Nutrients, Heavy Metals and Energy Cycling, and Flow*, Springer, Cham 2016, s. 247–265, https://doi.org/10.1007/978-3-319-38927-1_18.
- [10] Józwiakowski K., Malik A., Gajewska M., Marzec M., Gizińska-Górna M., Kowalczyk-Juśko A., Pytka A., *Hybrydowa hydrofitowa oczyszczalnia ścieków dla Ośrodka Dydaktyczno-Muzealnego Poleskiego Parku Narodowego w Starym Załuczu*, 2020 [maszynopis].
- [11] Józwiakowski K., Marzec M., Kowalczyk-Juśko A., Gizińska-Górna M., Pytka-Woszczyło A., Malik A., Listosz A., Gajewska M., *25 years of research and experiences about the application of constructed wetlands in southeastern Poland*, *Ecological Engineering*, 2019, vol. 127, s. 440–453, <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.12.013>.
- [12] Turcios A.E., Miglio R., Vela R., Sánchez G., Bergier T., Włodyka-Bergier A., Cifuentes J.I., Pignataro G., Avellan T., Papenbrock J., *From natural habitats to successful application – role of halophytes in the treatment of saline wastewater in constructed wetlands with a focus on Latin America*, *Environmental and Experimental Botany*, 2021, vol. 190, nr art. 104583, s. 1–18, <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104583>.

EFEKT WPROWADZENIA ZAKAZU PALENIA WĘGLEM NA WYBRANYM OBSZARZE MIEJSKIM

Krzysztof Pytel¹, Małgorzata Piaskowska-Silarska², Mykhaylo Lobur³

¹ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Katedra Systemów Energetycznych i Urządzeń Ochrony Środowiska Kraków, Polska

² Uniwersytet Komisji Edukacji Narodowej w Krakowie, Instytut Nauk Technicznych, Katedra Mechatroniki i Materiałów Funkcjonalnych, Kraków, Polska

³ Uniwersytet Narodowy Politechnika Lwowska, Katedra Systemów Projektowania Wspomagającego Komputerowo, Lwów, Ukraina

e-mail: krzysztof.pytel@agh.edu.pl, malgorzata.piaskowska-silarska@up.krakow.pl,
mykhaylo.v.lobur@lpnu.ua

Słowa kluczowe: poprawa jakości powietrza, redukcja emisji zanieczyszczeń, ekologiczne źródła ciepła

Streszczenie: Publikacja prezentuje analizę wpływu polityki prośrodowiskowej i wprowadzenia zakazu spalania węgla na obszarze miejskim na jakość powietrza w okresie od 2011 do 2021 roku. Badanie bazuje na analizie danych pochodzących ze stacji pomiarowych. Wyniki przedstawione w publikacji służą do ilościowej oceny zmian jakości powietrza. Zastosowanie zakazu palenia węglem przyczyniło się do znaczącej poprawy stanu powietrza, nawet w trudnych warunkach sprzyjających powstawaniu smogu na obszarach, gdzie takie warunki szczególnie często występują. Działania antysmogowe, w tym wymiana przestarzałych pieców na ekologiczne źródła ciepła, doprowadziły do znacznego ograniczenia problemu smogu spowodowanego ogrzewaniem paliwami stałymi w zanieczyszczonym regionie. Inicjatywy te są istotnym krokiem w kierunku zrównoważonego rozwoju obszarów miejskich, stanowiąc wzorzec dla podobnych działań w innych regionach dotkniętych problemem smogu. Wnioski z analizy wskazują na konieczność kontynuacji i rozszerzenia działań mających na celu poprawę jakości powietrza na obszarach miejskich.

1. Wprowadzenie

Spalane paliwo stałe jest źródłem zanieczyszczeń powietrza, obejmujących substancje szkodliwe dla zdrowia i życia, takie jak pyły zawieszone PM_{2.5} i PM₁₀, tlenki azotu (NO_x) czy benzen. Równocześnie te substancje przyczyniają się do powstawania smogu, który negatywnie wpływa na zwierzęta i rośliny. Problem zanieczyszczenia powietrza jest szczególnie istotny na obszarach miejskich, gdzie wysoka gęstość zaludnienia oraz intensywna

działalność przemysłowa i transportowa skutkują wzrostem emisji zanieczyszczeń, wymuszając zakrojone na szeroką skalę działania wpisujące się w ideę zrównoważonego rozwoju [1].

Istotą zrównoważonego rozwoju jest długoterminowa równowaga pomiędzy społeczeństwem, gospodarką a środowiskiem naturalnym. Ograniczanie emisji zanieczyszczeń przyczynia się do poprawy jakości powietrza, stymuluje rozwój technologii przyjaznych dla środowiska, co przekłada się na zdrowie mieszkańców, rozwija zainteresowanie odnawialnymi źródłami energii i produkcją czystej energii, co z kolei przyspiesza proces transformacji energetycznej. Zrównoważony rozwój wymaga wprowadzenia przepisów i regulacji dotyczących emisji zanieczyszczeń. Polityki antysmogowe, które obejmują limity emisji dla przemysłu, transportu oraz wielu innych sektorów gospodarki, są niezbędne do skutecznego ograniczania smogu i poprawy jakości powietrza. Niezbędne jest również odpowiednie planowanie przestrzenne. Tworzenie obszarów zielonych, parków miejskich oraz obszarów rekreacyjnych sprzyja poprawie jakości powietrza dzięki absorpcji zanieczyszczeń z atmosfery przez rośliny. Z kolei planowanie przestrzenne uwzględniające ułatwienia dla pieszych, rowerzystów i komunikacji publicznej przyczynia się do ograniczenia emisji z pojazdów prywatnych, które również są jednym z ważniejszych źródeł smogu [2].

Termin „smog” został zastosowany po raz pierwszy w 1905 roku w odniesieniu do połączenia naturalnej mgły i dymu węglowego, natomiast samo zjawisko obserwowane było od czasów średniowiecza, kiedy rozpoczęto spalanie węgla zamiast coraz bardziej deficytowego drewna. W miarę jak miasta się rozwijały, wykorzystywanie węgla stawało się coraz bardziej powszechne, a emisja dymu i zanieczyszczeń atmosferycznych rosła. Pierwsze próby rozwiązania tego problemu również podejmowano w średniowieczu, ale nie przyniosły one trwałych rezultatów. Mimo zakazów mieszkańcy podtrzymywali spalanie węgla z uwagi na brak tańszych źródeł ciepła. Potęgowało to problemy z mgłą i smogiem, które stawały się coraz poważniejsze. Wzrastała liczba dni, w których mgła spowodowana dymem węglowym zakłócała życie mieszkańców miast. Choć udokumentowano, że w Londynie w 1873 roku mgła przyczyniła się do śmierci wielu osób z powodu zapalenia oskrzeli, dopiero w latach pięćdziesiątych XX wieku rozpoczęto tam systematyczną kontrolę zanieczyszczenia powietrza. Miał na to wpływ tragiczny epizod smogowy z 1952 roku, kiedy czterodniowa mgła spowodowała śmierć około 4 tysięcy londyńczyków. W 1956 roku parlament brytyjski wprowadził ustawę o czystym powietrzu, która skutecznie ograniczyła spalanie węgla i zainicjowała długotrwałe działania w celu poprawy jakości powietrza w Londynie. Ten przykład zainspirował kolejne metropolie.

Epizody smogowe były rezultatem intensywnego spalania węgla w przemyśle i gospodarstwach domowych, co doprowadziło do znacznego zanieczyszczenia powietrza w okolicach dużych miast. To pokazało problem jakości powietrza w szerszym kontekście i wpłynęło na tworzenie regulacji oraz podejmowanie działań mających na celu kontrolowanie emisji. Działania takie były katalizatorem zmian w polityce ochrony środowiska, promowały zrównoważone praktyki przemysłowe i transportowe oraz przyczyniły się do późniejszych zmian w zakresie kontroli emisji i podnoszenia jakości powietrza na całym świecie. Zagrożenie ze strony smogu skutkowało wśród społeczeństwa zwiększeniem świadomości ekologicznej i skłoniło je do podejmowania decyzji mających na celu ochronę środowiska i zdrowia ludzi [3]. Wspieranie zachowań proekologicznych, takich jak oszczędzanie energii, korzystanie z komunikacji publicznej czy stosowanie ekologicznych źródeł ciepła, przyczyniło się do tworzenia bardziej ekologicznych środowisk. Integracja polityk antysmogowych z innymi inicjatywami zrównoważonego rozwoju, takimi jak efektywne zarządzanie odpadami czy

kreowanie przestrzeni publicznych przystosowanych do potrzeb pieszych i rowerzystów, doprowadziła do powstania obszarów bardziej przyjaznych dla mieszkańców miast.

Tematem publikacji jest analiza jakości powietrza na wybranym obszarze miejskim w okresie od 2011 do 2021 roku. Analizę oparto na danych pochodzących ze stacji pomiarowych. Skoncentrowano się na ocenie jakości powietrza w kontekście zmian ilości zanieczyszczeń w wybranym przedziale czasowym, wyciągnięto wnioski dotyczące tendencji oraz wskazano na potrzeby konkretnych działań mających na celu poprawę jakości powietrza.

2. Analiza jakości powietrza na wybranym obszarze miejskim

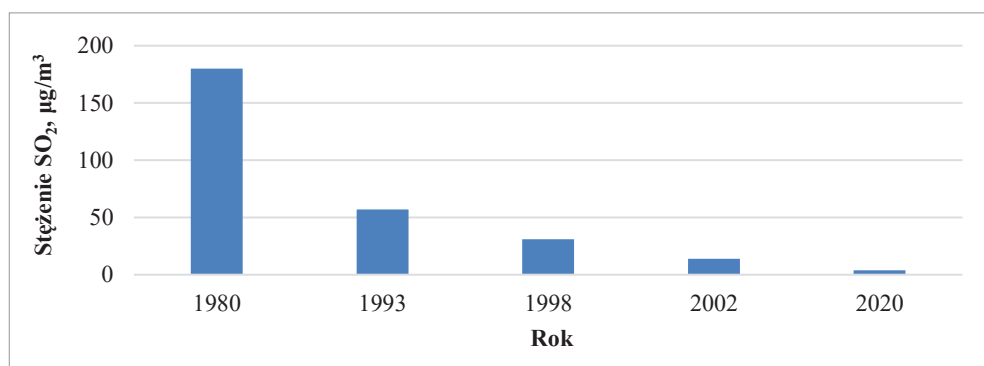
Na analizowanym obszarze miejskim, pomimo wprowadzenia restrykcyjnych przepisów mających na celu poprawę jakości powietrza, obserwowano regularnie wysoki poziom zanieczyszczeń. Ta alarmująca sytuacja wymagała natychmiastowej reakcji, dlatego wprowadzono zakaz palenia paliwami stałymi w gospodarstwach domowych. Równocześnie podjęto skuteczne działania związane ze stałym monitoringiem poziomu zanieczyszczenia powietrza, co pozwoliło na zidentyfikowanie zagrożenia, jakim była niska jakość powietrza na analizowanym obszarze miejskim, oraz na wprowadzenie skuteczniejszych środków prewencyjnych. Regularnie udostępniane analizy jakości powietrza stanowiły efektywny sposób podnoszenia świadomości ekologicznej mieszkańców. Informacja na temat zanieczyszczenia powietrza kształtowała ich postawy, oddziałując na codzienne decyzje, które bezpośrednio wpływały na jakość powietrza. Publikowanie danych na temat poziomu stężeń zanieczyszczeń, częstotliwości przekraczania norm oraz wynikających z tego następstw dla mieszkańców skutkowało korzyściami społecznymi. Pracodawcy i urzędnicy, którzy mieli dostęp do tych danych, mogli podjąć świadome i odpowiednie działania w swoich przedsiębiorstwach czy instytucjach z uwzględnieniem parametrów jakości powietrza. Nie tylko przyczyniło się to do poprawy stanu zdrowia mieszkańców zanieczyszczonego obszaru, ale także pozwoliło ograniczyć wysokie koszty hospitalizacji i długotrwałego leczenia osób cierpiących na różnego rodzaju choroby i schorzenia wynikające z niskiej jakości powietrza atmosferycznego. Regularne analizy jakości powietrza stanowiły element długoterminowego planowania zrównoważonego rozwoju obszaru miejskiego. Równocześnie uzyskano informacje o kosztach wynikłych z zanieczyszczenia powietrza na analizowanym obszarze miejskim, które według badań przeprowadzonych przez European Public Health Alliance (EPHA) i opublikowanych w 2020 roku sięgały około 1,5 mld euro rocznie. Skala nakładów wynikała ze sumowania wszystkich kosztów, wśród których dominowały koszty leczenia chorób wywołanych zanieczyszczeniem powietrza, utraty produktywności ze względu na choroby czy zmniejszenia atrakcyjności miejsca dla inwestorów i turystów. Dodano również niematerialne i trudne do oszacowania w kategoriach finansowych straty powiązane z pogorszeniem jakości życia mieszkańców. Zidentyfikowane koszty skutkowały działaniami mającymi na celu poprawę jakości powietrza na analizowanym obszarze miejskim. Działania te stanowiły inwestycję w zdrowie publiczne oraz przyszłość gospodarki lokalnej, przyczyniając się do zmniejszenia zanieczyszczenia powietrza oraz poprawy jakości życia mieszkańców. To z kolei wpłynęło na zwiększenie atrakcyjności miejsca dla inwestorów, turystów i mieszkańców, co przełożyło się na długoterminowe korzyści ekonomiczne i społeczne na analizowanym obszarze miejskim [4].

2.1. Zanieczyszczenie związane z lokalizacją

Problem smogu był na przełomie XX i XXI wieku przedmiotem intensywnych debat społecznych, które zmieniały swoją dynamikę na przestrzeni lat. W pracy Kazema ze współautorami [5] przeanalizowano jakość powietrza na wybranym obszarze miejskim. Analiza ukształtowania terenu pod kątem powstawania smogu koncentrowała się na zjawisku inwersji termicznej, której istotnym elementem jest taki układ temperatury w atmosferze, w którym chłodniejsze powietrze zalega przy powierzchni ziemi, podczas gdy cieplejsze warstwy unoszą się wyżej. Zjawisko to, często związane z ukształtowaniem terenu, może być intensyfikowane przez czynniki atmosferyczne. Przeprowadzono analizę obszaru o średnicy do 35 km, uwzględniając różnice wysokości obserwowalne na obrzeżach miasta, które wynoszą około 100 m. Teren wokół obszaru miejskiego charakteryzował się głównie występowaniem dolin, sprzyjających zjawisku inwersji termicznej, co zwiększało ryzyko wystąpienia smogu. Zaobserwowano wyraźny związek pomiędzy ukształtowaniem terenu a zanieczyszczeniem powietrza.

2.2. Zanieczyszczenie związane z przemysłem

Zanieczyszczenia powietrza generowane przez przemysł są poważnym problemem zdrowotnym i środowiskowym. W drugiej połowie XX wieku analizowana lokalizacja doświadczyła gwałtownego rozwoju przemysłowego, który zaowocował powstaniem dużych ośrodków metalurgicznych i licznych zakładów produkcyjnych, mających istotny negatywny wpływ na środowisko. Wiązało się to także ze znaczącym wzrostem zatrudnienia w sektorze przemysłowym. Negatywnym skutkiem rozwoju gospodarczego był widoczny spadek jakości powietrza, co wywołało lokalne protesty społeczne i intensyfikację inicjatyw lokalnych ekologów. W odpowiedzi na nie opracowano strategię, której celem była poprawa sytuacji osiągnięta dzięki ograniczeniu liczby emiterów zanieczyszczeń. Modernizacja pozostałych w mieście zakładów przemysłowych znacząco przyczyniła się do ograniczenia emisji dwutlenku siarki do atmosfery (rys. 1). Te inicjatywy stanowiły pierwszy krok w kierunku ochrony środowiska naturalnego i zdrowia mieszkańców, wyznaczając drogę dla przyszłych aktywności mających na celu dalszą poprawę jakości życia w mieście [2].



Rys. 1. Stężenia dwutlenku siarki na przestrzeni lat na analizowanym obszarze miejskim

W ostatnich dekadach XX i na początku XXI wieku podjęto intensywne prace mające na celu poprawę jakości powietrza. Mimo że problem zanieczyszczenia dwutlenkiem siarki został praktycznie rozwiązany zgodnie z zaleceniami WHO, inne wskaźniki nadal pozostawały na niebezpiecznym poziomie. W odpowiedzi na to podjęto szereg inicjatyw, w tym wprowadzono ograniczenia dotyczące palenisk domowych, kontrolę prywatnych kotłowni, walkę ze spalaniem śmieci oraz program wymiany starych kotłów na ekologiczne źródła energii. Wdrożono ograniczenia w eksploatacji instalacji spalających paliwa, a od września 2019 roku obowiązuje zakaz palenia paliwami stałymi na terenie miasta. Te przedsięwzięcia znacząco przyczyniły się do poprawy jakości powietrza [4].

2.3. Metodyka i wyniki pomiarów

Badania nad emisją pyłów do atmosfery wykazały, że głównym źródłem tego zanieczyszczenia jest proces ogrzewania domów i innych budynków. W wielu przypadkach emisja pyłów jest spowodowana spalaniem paliw stałych w przestarzałych kotłach grzewczych. Analizy przeprowadzone na próbkach powietrza oraz danych z monitoringu atmosferycznego potwierdziły, że stosowanie przestarzałych technologii grzewczych było istotnym czynnikiem przyczyniającym się do obecnego poziomu zanieczyszczenia pyłami zawieszonymi w powietrzu. Zanieczyszczenia tego rodzaju oddziałują negatywnie na jakość powietrza. W związku z powyższym zaistniała pilna potrzeba wprowadzenia skutecznych środków kontroli emisji pyłów do atmosfery, zwłaszcza przez eliminację przestarzałych kotłów grzewczych oraz promowanie bardziej ekologicznych i efektywnych technologii. Działania te nie tylko przyczyniły się do poprawy jakości powietrza, ale także pomogły w ograniczeniu negatywnych skutków zmian klimatycznych związanych z emisją szkodliwych substancji do atmosfery [3].

Przeprowadzona analiza dotyczyła oceny jakości powietrza w latach 2011–2021. Skupiono się na średnich rocznych wartościach PM₁₀ i PM_{2.5}, NO₂ i SO₂ oraz benzo(a)pirenu w PM₁₀ [3]. W analizie porównywane są średnie roczne zanieczyszczenia policzone ze średnich dobowych zanieczyszczeń (tab. 1). Wybrane wyniki przedstawiono graficznie na rysunku 2.

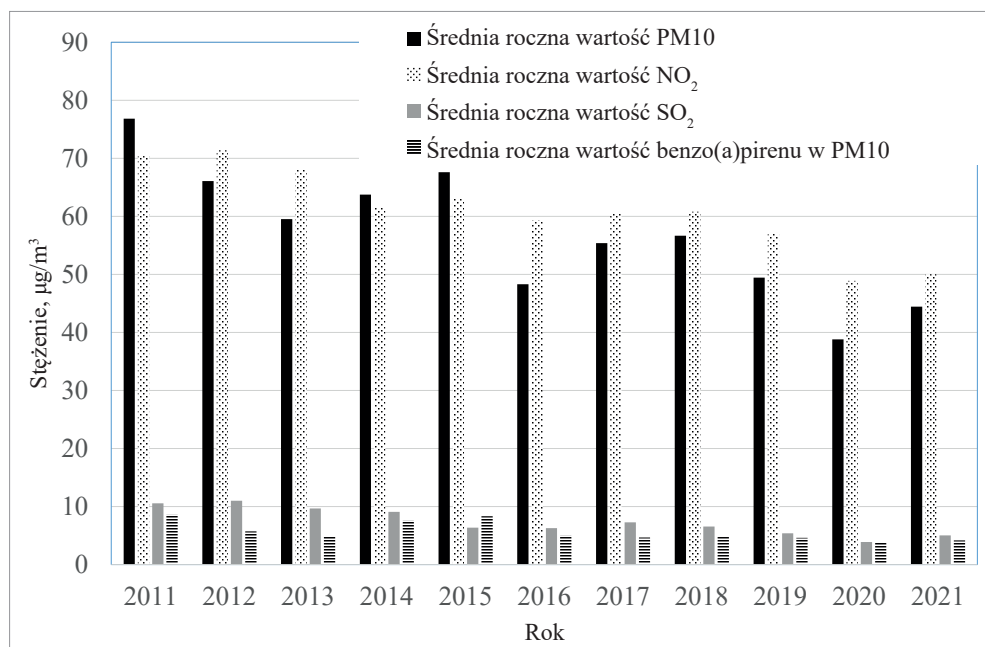
Tabela 1. Zanieczyszczenia w latach 2011–2021 na podstawie danych ze stacji meteorologicznych w aspekcie zaleceń WHO

Rok	Średnia roczna temperatura [°C]	Liczba dni, w których zanieczyszczenie PM ₁₀ >50 µg/m ³	Średnia roczna wartość PM ₁₀ * [µg/m ³]	Średnia roczna wartość PM _{2.5} ** [µg/m ³]	Średnia roczna wartość NO ₂ *** [µg/m ³]	Średnia roczna wartość SO ₂ **** [µg/m ³]	Średnia roczna wartość benzo(a)pirenu w PM ₁₀ [µg/m ³]
2011	10,05	209,00	76,83	54,98	70,40	10,56	8,58
2012	9,76	135,00	66,07	46,19	71,40	11,00	5,74
2013	9,55	165,00	59,54	43,48	68,00	9,68	4,84
2014	10,70	192,00	63,75	45,02	61,50	9,08	7,55
2015	11,00	205,00	67,61	43,85	63,10	6,38	8,34

Tabela 1 cd.

Rok	Średnia roczna temperatura [°C]	Liczba dni, w których zanieczyszczenie PM10 >50 µg/m³	Średnia roczna wartość PM10* [µg/m³]	Średnia roczna wartość PM2.5** [µg/m³]	Średnia roczna wartość NO ₂ *** [µg/m³]	Średnia roczna wartość SO ₂ **** [µg/m³]	Średnia roczna wartość benzo(a)pirenu w PM10 [µg/m³]
2016	10,40	166,00	48,31	37,87	59,30	6,27	4,98
2017	10,20	131,00	55,39	40,10	60,53	7,29	4,67
2018	10,80	169,00	56,67	39,37	60,82	6,57	4,76
2019	11,30	131,00	49,46	29,16	57,13	5,39	4,63
2020	10,90	81,00	38,81	23,92	48,88	3,89	3,89
2021	9,80	104,00	44,46	24,05	50,02	5,03	4,17

Zalecenia WHO: *40 µg/m³; **25 µg/m³; ***350 µg/m³/h; 125 µg/m³/24 h; ****40 µg/m³.

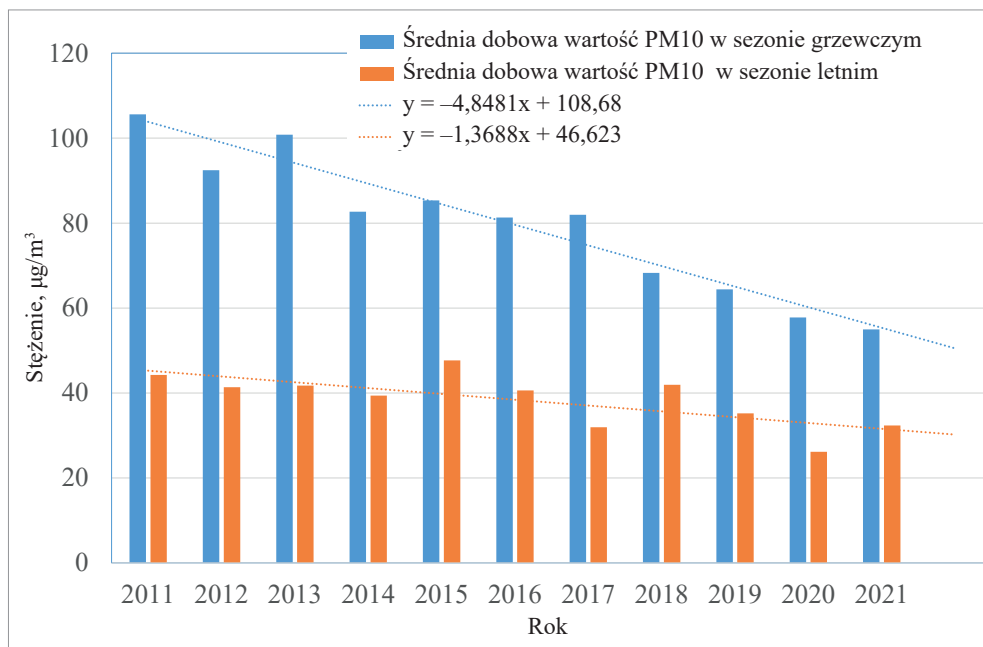


Rys. 2. Stężenia zanieczyszczeń w latach 2011–2021 na analizowanym obszarze miejskim

Okres pomiarowy można podzielić na trzy etapy: pierwszy, obejmujący okres przed wprowadzeniem ograniczeń w stosowaniu źródeł ciepła z paliw stałych (2011–2013), drugi, przejściowy, w którym nastąpiła systemowa wymiana źródeł ciepła na paliwa stałe (2014–2019), oraz trzeci – okres całkowitego zakazu spalania paliw stałych w domowych paleniskach (po 2019).

Przeprowadzona analiza danych potwierdziła pozytywny wpływ wprowadzenia zakazu palenia węglem na badanym obszarze miejskim od 2019 roku. W porównaniu z okresem przed rokiem 2014, gdy rozpoczęła się systemowa wymiana źródeł ciepła, wprowadza-

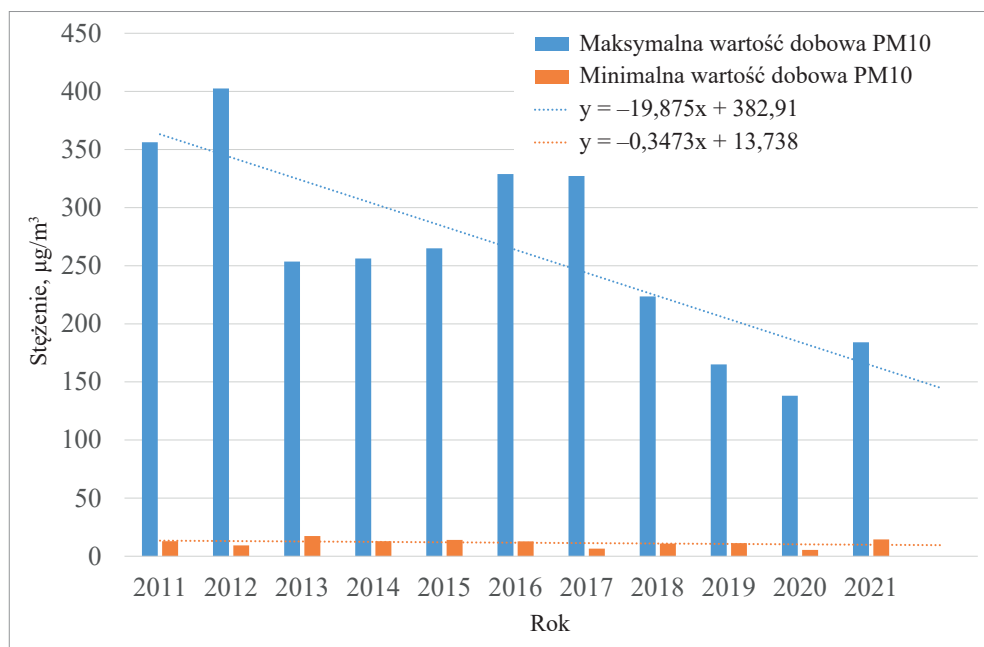
dzenie tego zakazu znacząco poprawiło jakość powietrza. Średnioroczna redukcja stężenia pyłów PM10 wyniosła 34,4%: 40,7% w okresach zimowych i 26,4% w okresach letnich (rys. 3). Również wartość maksymalnego i minimalnego stężenia PM10 zmniejszyła się o 51,9% i 21,4% (rys. 4). Ograniczenie emisji spowodowało także znaczny spadek poziomu innych zanieczyszczeń: średnie stężenia roczne NO₂ zmniejszyły się o 27,4%, SO₂ o 49,25%, PM2.5 o 46,67%, a benzo(a)pirenu w PM10 o 33,77%. Mimo wzrostu średniorocznej temperatury o 8,25% ograniczenie emisji pozwoliło utrzymać niższe poziomy zanieczyszczeń, co korzystnie wpłynęło na zdrowie mieszkańców [3].



Rys. 3. Stężenia zanieczyszczeń PM10 w latach 2011–2021 na analizowanym obszarze miejskim w sezonie grzewczym i okresie letnim

W zakresie poprawy jakości powietrza nadal istnieją jednak wyzwania, szczególnie związane z przekraczaniem rocznych limitów WHO dla PM10. W związku z tym konieczne jest podtrzymywanie i wzmocnienie dotychczas podejmowanych działań. Kontynuacja ograniczania emisji oraz implementacja nowych technologii są kluczowe dla osiągnięcia długoterminowej poprawy jakości powietrza w regionie, co przyniesie korzyści zarówno dla zdrowia, jak i jakości życia mieszkańców.

Spalanie paliw stałych jest jednym z głównych źródeł emisji pyłów zawieszonych. Zakaz korzystania z węgla czy drewna przyczynił się do ograniczenia ilości zanieczyszczeń. Ta decyzja wpłynęła pozytywnie na jakość powietrza dzięki znacznej redukcji emisji szkodliwych substancji, takich jak pyły zawieszone (PM2.5 i PM10), dwutlenek siarki (SO₂) czy tlenki azotu (NO_x). Wprowadzenie zakazu spalania paliw stałych przekłada się na ograniczenie emisji gazów cieplarnianych, w tym dwutlenku węgla (CO₂), a co za tym idzie – na ograniczenie niekorzystnych zmian klimatycznych [5].



Rys. 4. Stężenia zanieczyszczeń PM10 w latach 2011–2021 na analizowanym obszarze miejskim w ujęciu wartości maksymalnych i minimalnych dobowych

Zakaz spalania paliw stałych stanowi skuteczne narzędzie w walce z zanieczyszczeniem powietrza, przynosząc korzyści dla zdrowia ludzi oraz dla środowiska naturalnego [2].

3. Podsumowanie

W publikacji poddano analizie jakość powietrza na określonym obszarze miejskim w latach 2011–2021. Skupiono się na problemie zanieczyszczenia powietrza w wyniku spalania paliw stałych, takich jak węgiel czy drewno, które emitują szkodliwe substancje, w tym pyły zawieszone (PM2.5 i PM10), tlenki azotu (NO_x), tlenki siarki SO_x oraz benzo(a)piren. Analizy wykazały, że ogrzewanie domów przy użyciu przestarzałych technologii było źródłem emisji pyłów do atmosfery. W odpowiedzi na ten problem wprowadzono szereg środków takich jak zakaz spalania paliw stałych oraz kontrola prywatnych kotłowni, co przyczyniło się do poprawy jakości powietrza.

Równocześnie analizy terenu wykazały związek między ukształtowaniem terenu a występowaniem smogu, zwłaszcza w dolinach, gdzie inwersja termiczna wzmocniała skutki zanieczyszczenia powietrza. W ramach działań przeciwsmogowych podjęto wysiłki mające na celu modernizację przemysłu, ograniczenie emisji z zakładów produkcyjnych oraz wymianę przestarzałych źródeł ciepła.

Analiza danych pokazała, że wprowadzenie zakazu spalania paliw stałych w 2019 roku przyniosło znaczne korzyści dla jakości powietrza. Mimo to dalej aktualny jest problem

przekraczania rocznych limitów WHO dotyczących PM10, a w związku z tym wymagane są dalsze działania w kierunku poprawy jakości powietrza. Kontynuowanie działań mających na celu redukcję emisji oraz implementowanie nowych technologii jest niezbędne dla osiągnięcia długoterminowej poprawy jakości powietrza w analizowanym regionie miejskim. Działania te przyniosą niezaprzeczalne korzyści społeczne i ekonomiczne dla mieszkańców oraz przysłużą się ochronie środowiska naturalnego.

Bibliografia

- [1] Pytel K., Hudy W., Kurdziel F., Kalwar A., Gumula S., Soliman M.H., *Application of correlation analysis for impact assessment of air quality on the possibility of using chosen source of renewable energy*, [w:] *MEMSTECH: 2020 IEEE XVIth International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design: Lviv, April 22–26, 2020: Proceedings*, IEEE, Piscataway 2020, s. 17–21, <https://doi.org/10.1109/MEMSTECH49584.2020.9109502>.
- [2] Sulaiman S.A., Singh A.K., Mokhtar M.M., Bou-Rabee M.A., *Influence of dirt accumulation on performance of PV panels*, *Energy Procedia*, 2014, vol. 50, s. 50–56, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.06.006>.
- [3] Olejarsz M., *Wpływ zakazu palenia węglem w Krakowie na jakość powietrza*, Uniwersytet Pedagogiczny w Krakowie, Kraków 2022 [praca dyplomowa, niepublikowana].
- [4] Pytel K., Hudy W., *Use of evolutionary algorithm for identifying quantitative impact of PM2.5 and PM10 on PV power generation*, *Energies*, 2022, vol. 15, nr art. 8192, <https://doi.org/10.3390/en15218192>.
- [5] Kazem H.A., Chaichan M.T., Al-Waeli A.H.A., Sopian K., *A novel model and experimental validation of dust impact on grid-connected photovoltaic system performance in Northern Oman*, *Solar Energy*, 2020, vol. 206, s. 564–578, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.06.043>.

WPLYW ZANIECZYSZCZENIA POWIETRZA NA ZDROWIE I ŚRODOWISKO NATURALNE ORAZ WYBRANE DZIAŁANIA PREWENCYJNE

Krzysztof Pytel¹, Henryk Noga², Mykhaylo Melnyk³

¹ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Katedra Systemów Energetycznych i Urządzeń Ochrony Środowiska, Kraków, Polska

² Uniwersytet Komisji Edukacji Narodowej w Krakowie, Instytut Nauk Technicznych, Katedra Edukacji Technicznej i Informatycznej, Kraków, Polska

³ Uniwersytet Narodowy Politechnika Lwowska, Katedra Systemów Projektowania Wspomagającego Komputerowo, Lwów, Ukraina

e-mail: krzysztof.pytel@agh.edu.pl, henryk.noga@up.krakow.pl, Mykhaylo.R.Melnyk@lpnu.ua

Słowa kluczowe: poprawa jakości powietrza, redukcja emisji zanieczyszczeń, ekologiczne źródła ciepła

Streszczenie: W pracy przedstawiono problem zanieczyszczenia powietrza i jego negatywnego wpływu na zdrowie społeczeństwa oraz środowisko naturalne. Analizowano główne źródła emisji zanieczyszczeń, takie jak przemysł energetyczny, pojazdy silnikowe oraz rolnictwo, z podkreśleniem ich wpływu na jakość powietrza. Omówiono różne rodzaje zanieczyszczeń powietrza, w tym pyły zawieszone, tlenki azotu, benzo(a)piren oraz związki siarki, pochodzące zarówno z przemysłu, jak i z pojazdów silnikowych oraz rolnictwa. Przeanalizowano skutki zdrowotne zanieczyszczeń powietrza, szczególnie w kontekście chorób układu oddechowego, sercowo-naczyniowego oraz związków z nowotworami. Podkreślono, że długotrwała ekspozycja na zanieczyszczenia powietrza może prowadzić do wzrostu liczby zgonów oraz zwiększonego ryzyka wystąpienia schorzeń. Wskazano na konieczność podejmowania działań zarówno na poziomie lokalnym, jak i globalnym, obejmujących regulacje prawne, promowanie odnawialnych źródeł energii, poprawę standardów emisji pojazdów oraz edukację społeczeństwa.

1. Wprowadzenie

Zjawisko smogu ma istotny wpływ na jakość powietrza i zdrowie mieszkańców. Smog, będący połączeniem dymu i mgły, zawiera szkodliwe substancje, takie jak pyły zawieszone, tlenki azotu, benzo(a)piren czy związki siarki. Istnieją dwa jego główne rodzaje: londyński,

związany z okresem zimowym i emisją substancji z ogrzewania, oraz fotochemiczny (typu Los Angeles), powstający w wyniku reakcji zanieczyszczeń pod wpływem światła słonecznego. Smog ma istotny wpływ na zdrowie. Liczne źródła naukowe oraz dane statystyczne udowadniają, że ekspozycja na zanieczyszczenia powietrza, zwłaszcza pyły zawieszone (PM10 i PM2.5), może znacząco zwiększać ryzyko wystąpienia chorób układu oddechowego i sercowo-naczyniowego, a także prowadzić do zwiększenia liczby zgonów. Badania przeprowadzone na różnych grupach społecznych wykazały, że długotrwała ekspozycja na smog może przyczyniać się do wzrostu śmiertelności wśród osób narażonych na działanie tych substancji. Ma on także negatywny wpływ na rozwijający się organizm dziecka, ponieważ może powodować przewlekłe infekcje dróg oddechowych. Wpływa również niekorzystnie na rozwój płodu. Wszystko to motywuje do zwiększenia działań mających na celu redukcję zanieczyszczeń powietrza [1, 2].

Smog jest problemem globalnym, mającym negatywny wpływ na zdrowie ludzi na całym świecie. Zdecydowane działania zarówno na poziomie lokalnym, jak i globalnym są konieczne, aby zmniejszyć emisję substancji szkodliwych dla środowiska i zdrowia ludzi. Ochrona powietrza staje się kwestią strategiczną dla zdrowia publicznego, a podejmowane działania powinny być kompleksowe, obejmując regulacje prawne i edukację społeczeństwa oraz inwestycje w technologie przyjazne dla środowiska.

2. Zanieczyszczenie powietrza – skutki i działania zapobiegawcze

Zanieczyszczenie powietrza jest jednym z ważniejszych problemów środowiskowych. Jest wynikiem emisji szeregu substancji chemicznych i fizycznych do atmosfery, co ma negatywny wpływ na zdrowie ludzi, ekosystemy oraz klimat. Główne źródła zanieczyszczeń powietrza to emisje z ogrzewania i produkcji energii, przemysłu, pojazdów silnikowych oraz rolnictwa. Skutki zdrowotne zanieczyszczenia powietrza są najbardziej widoczne w przypadku problemów układu oddechowego, wpływają na zwiększone ryzyko chorób serca, mają związek z chorobami nowotworowymi. Działania zapobiegawcze uwzględniające redukcję zanieczyszczeń powietrza obejmują promowanie energii odnawialnej, poprawę standardów emisji zanieczyszczeń przez pojazdy, edukację społeczeństwa czy wreszcie inwestycje w transport publiczny [3].

Zanieczyszczenie powietrza wymusza działania mające na celu redukcję emisji i poprawę jakości powietrza. Dzięki wprowadzanim regulacjom, promowaniu technologii przyjaznych dla środowiska i zwiększaniu świadomości społeczeństwa następuje ciągłe ograniczanie wpływu zanieczyszczenia powietrza na zdrowie publiczne, co przyczynia się do tworzenia zrównoważonego i zdrowego środowiska życia [4].

2.1. Zanieczyszczenie pochodzące z energetyki

Przemysł energetyczny dostarcza energii niezbędnej do rozwoju, ale procesy związane z jej produkcją często prowadzą do znacznego zanieczyszczenia powietrza. W XXI wieku – ze względu na rosnące zapotrzebowanie na energię oraz postępujące zmiany klima-

tyczne – ograniczenie zanieczyszczenia powietrza związanego z przemysłem energetycznym stało się jednym z głównych wyzwań środowiskowych. Przemysł ten jest źródłem różnorodnych zanieczyszczeń powietrza, w tym gazów cieplarnianych, pyłów zawieszonych, tlenków siarki (SO_x), tlenków azotu (NO_x), organicznych związków lotnych (VOCs) oraz metali ciężkich. Te substancje są emitowane zarówno podczas spalania paliw kopalnych, jak i podczas produkcji energii elektrycznej w elektrowniach jądrowych. Jednym z głównych zanieczyszczeń związanych z przemysłem energetycznym jest dwutlenek węgla (CO_2), gaz cieplarniany odpowiedzialny w największym stopniu za globalne ocieplenie. Emisje CO_2 pochodzą głównie ze spalania węgla, ropy naftowej i gazu ziemnego. Pyły zawieszone ($\text{PM}_{2.5}$ i PM_{10}) to mikroskopijne cząsteczki stałe unoszące się w powietrzu, które są łatwo wdychane przez ludzi. Zanieczyszczenie pyłami wykazuje korelację z chorobami układu oddechowego, w tym z astmą, przewlekłymi chorobami płuc oraz chorobami serca. Źródłem emisji tlenków azotu (NO_x) i pyłów siarki (SO_x) również są głównie przemysłowe procesy spalania paliw kopalnych. Wymienione substancje przyczyniają się do powstawania kwasów deszczowych wpływających na zakwaszenie gleby, zatrucie wód gruntowych oraz uszkodzanie roślin. Ponadto tlenki azotu mają negatywny wpływ na zdrowie ludzi, prowadząc do problemów z oddychaniem i podrażnienia dróg oddechowych. Te zanieczyszczenia powietrza stanowią poważne zagrożenie dla zdrowia ludzi oraz dla ekosystemów naturalnych, a w miarę rozwoju technologii odnawialnych oraz wprowadzania środków ograniczających emisje zmniejsza się ich negatywny wpływ na jakość powietrza [5, 6].

2.2. Zanieczyszczenia emitowane przez pojazdy

Zanieczyszczenia motoryzacyjne są poważnym problemem zdrowotnym i środowiskowym na całym świecie. Można je pogrupować na zanieczyszczenia emitowane przez pojazdy spalinowe i przez pojazdy elektryczne [7].

Emisje z pojazdów spalinowych, w tym tlenki azotu (NO_x), cząstki stałe ($\text{PM}_{2.5}$ i PM_{10}), dwutlenek siarki (SO_2) oraz związki organiczne lotne (VOCs), w ciągu XXI wieku zwiększyły się z uwagi na wzrost liczby pojazdów na drogach oraz używanie tradycyjnych paliw. Emitowane tlenki azotu (NO_x) to głównie azotyn (NO) i dwutlenek azotu (NO_2), które są produktami spalania paliw w silnikach samochodowych. NO_x przyczyniają się do powstawania smogu, kwaśnych deszczy oraz są głównym składnikiem pyłów $\text{PM}_{2.5}$. Tego rodzaju zanieczyszczenia mają wpływ na układ oddechowy, prowadząc do astmy i przewlekłych chorób płuc oraz zwiększając ryzyko chorób serca. Cząstki stałe $\text{PM}_{2.5}$ (o średnicy mniejszej niż $2,5\ \mu\text{m}$) i PM_{10} (o średnicy mniejszej niż $10\ \mu\text{m}$) są szczególnie niebezpieczne z powodu możliwości wnikanie głęboko do układu oddechowego. Mała wielkość tych cząstek umożliwia im przenikanie do krwiobiegu, co może prowadzić do różnych chorób układu sercowo-naczyniowego, a nawet nowotworów. Dwutlenek siarki (SO_2) powstaje podczas spalania paliw zawierających siarkę. Jest głównym składnikiem kwaśnych deszczów. Związki organiczne lotne (VOCs) to natomiast substancje chemiczne, które przyczyniają się do powstawania smogu troposferycznego i są prekursorami ozonu troposferycznego. VOCs są emitowane głównie z pojazdów z napędem benzynowym i wpływają na zdrowie ludzi i środowisko, prowadząc do problemów z oddychaniem oraz obniżając jakość powietrza [8, 9].

W XXI wieku wprowadzono wiele technologii mających na celu ograniczenie emisji z pojazdów spalinowych, zastosowano systemy recyrkulacji spalin (EGR), katalizatory trójfunkcyjne oraz filtry cząstek stałych (DPF). Pomimo wprowadzenia nowych technologii

rosnąca liczba pojazdów na drogach sprawia, że istnieje potrzeba dalszych działań w celu ograniczenia emisji i ochrony jakości powietrza oraz zdrowia publicznego. Globalne inicjatywy, rozwijanie pojazdów elektrycznych oraz zachęty do korzystania z transportu publicznego są kluczowe dla redukcji zanieczyszczeń związanych z ruchem drogowym [4].

Ostatnio coraz powszechniej stosowane są pojazdy elektryczne, które są całkowicie bezemisyjne podczas użytkowania, ale mają również swoje wady. W ciągu ostatnich kilku lat zyskały one na popularności jako alternatywa wobec tradycyjnych aut spalinowych. Mimo że są uznawane za bardziej ekologiczne ze względu na brak emisji spalin bezpośrednio z pojazdu, ich wpływ na środowisko jest bardzo złożony. Pierwsze zagrożenie jest związane z produkcją i usuwaniem baterii, ponieważ podstawowym elementem pojazdów elektrycznych są akumulatory, które są często wykonane z takich metali jak lit, kobalt i nikiel. Proces produkcji baterii wymaga wydobycia surowców, co często prowadzi do zanieczyszczenia wód gruntowych i gleby w rejonach wydobywania. Lit jest pierwiastkiem z grupy alkalicznych metali, wydobywanym głównie w dwóch formach: z soli litu zawartych w solankach oraz z minerałów takich jak spodumen, lepidolit i ambligonit. Główne obszary jego eksploatacji to Australia, Chile, Argentyna, Zimbabwe, Portugalia, Brazylia, Rosja i Kanada. Proces wydobycia litu zwykle obejmuje ekstrakcję z solanek, a następnie przeróbkę na metaliczny lit lub związki, które są później stosowane w produkcji baterii. Pozyskiwanie kobaltu jest związane z wydobyciem miedzi i niklu. Kobalt jest metalem przejściowym, a jego najważniejszym minerałem jest kobercyt. Jest on najczęściej produktem ubocznym eksploatacji złóż, a główne regiony wydobycia obejmują Demokratyczną Republikę Konga, Zambię, Rosję, Australię, Kanadę i Finlandię. W Demokratycznej Republice Konga, która jest głównym producentem kobaltu na świecie, często jego wydobycie wiąże się z takimi zjawiskami jak praca dzieci czy korupcja. Pozyskiwanie niklu, który jest metalem przejściowym, obejmuje natomiast Indonezję, Filipiny, Rosję, Nową Kaledonię, Australię, Brazylię i Kanadę. Nikiel jest głównie wydobywany jako minerał siarczkowy, jak pentlandyt, czy w postaci tlenkowców, jak garnieryt. Proces przetwarzania niklu może być różny w zależności od formy mineralnej, ale zwykle obejmuje kruszenie, mielenie i przetapianie, a następnie rafinację chemiczną, aby uzyskać czysty nikiel. Wydobycie niklu może mieć szereg negatywnych skutków dla środowiska, zarówno bezpośrednich, jak i pośrednich. Zanieczyszczenie wód gruntowych powstające podczas pozyskiwania niklu wynika z faktu, że substancje chemiczne używane do przeróbki rudy mogą przedostawać się do wód gruntowych, powodując zanieczyszczenie wód pitnych i wód powierzchniowych. Produkty uboczne wydobycia, takie jak siarczany i metale ciężkie, mogą również zanieczyszczać wody, co prowadzi do utraty bioróżnorodności w ekosystemach wodnych. Zanieczyszczenie powietrza i zawarte w tych emisjach substancje, takie jak dwutlenek siarki i tlenki azotu, przyczyniają się do smogu, kwaśnego deszczu i problemów ze zdrowiem ludzi i zwierząt. Zmiany w krajobrazie spowodowane przez górnictwo, takie jak zanikanie lasów i ekosystemów mokradłowych, prowadzą do utraty bioróżnorodności. Usunięcie naturalnych siedlisk dla roślin i zwierząt powoduje ich wymarcie lub migrację, co zakłóca naturalne łańcuchy pokarmowe. Wydobycie niklu wywołuje degradację gleby, sprawiając, że jest ona niezdolna do podtrzymywania życia roślin i mikroorganizmów. To prowadzi do erozji gleby i utraty płodności, co ma negatywny wpływ na rolnictwo i lokalne społeczności. Ponadto przebywanie w pobliżu obszarów wydobycia niklu jest szkodliwe dla zdrowia ludzi ze względu na zanieczyszczenie powietrza i wód, a pracownicy kopalni są szczególnie narażeni na toksyczne substancje, które

mogą prowadzić do chorób układu oddechowego i innych schorzeń. Procesy pozyskiwania omawianych surowców są przyczyną potencjalnych problemów związanych z ochroną środowiska, respektowaniem praw pracowników i etyką wydobywania, a więc wyborem takich aktywności, które nie tylko generują korzyści ekonomiczne, ale również pozwalają na przestrzeganie praw ludzi i zasad ochrony środowiska [5]. Dodatkowym wyzwaniem są recykling i utylizacja zużytych baterii ze względu na zawarte w nich toksyczne składniki chemiczne.

Pojazdy elektryczne są bezemisyjne na poziomie lokalnym, ale ich ekologiczny wpływ zależy od źródła energii elektrycznej, z którego są zasilane. W krajach, gdzie energia elektryczna pochodzi głównie z paliw kopalnych, takich jak węgiel czy gaz, korzyści związane z ograniczeniem emisji CO₂ mogą być niewielkie [2].

Rozwinięta infrastruktura ładowania jest kluczowa dla popularyzacji pojazdów elektrycznych. Stacje ładowania często wymagają dużych ilości energii elektrycznej, co może prowadzić do większego jej zużycia i potencjalnych emisji gazów cieplarnianych, jeśli ta energia nie pochodzi z odnawialnych źródeł.

Zastępowanie pojazdów spalinowych elektrycznymi jest niewątpliwie krokiem w kierunku ograniczenia zanieczyszczeń powietrza, niemniej jednak ocena ekologicznych skutków takiej strategii wymaga holistycznego podejścia, uwzględniającego cały cykl życia pojazdów – od produkcji do utylizacji.

2.3. Zanieczyszczenie pochodzące z emisji z rolnictwa

Zanieczyszczenia powietrza pochodzące z emisji z rolnictwa przyczyniają się do problemów związanych z jakością wody, powietrza oraz utratą bioróżnorodności. Używanie pestycydów i nawozów chemicznych w rolnictwie prowadzi do zanieczyszczenia wód gruntowych. Nadmierne stosowanie nawozów powoduje wypłukiwanie substancji takich jak azotany do wód gruntowych, czego efektem są zakwity sinicowe (algi) i eutrofizacja wód, czyli nadmierna ilość składników odżywczych, co z kolei prowadzi do niedoboru tlenu i masowego obumierania organizmów wodnych. Emisje amoniaku są często związane z hodowlą zwierząt, zwłaszcza przemysłową. Amoniak jest prekursorem związków chemicznych, które przyczyniają się do powstawania aerozoli i kwasów deszczowych. Emisje metanu powodowane głównie hodowlą zwierząt przyczyniają się do efektu cieplarnianego. Zmiany w użytkowaniu ziemi i przekształcanie naturalnych ekosystemów w pola uprawne lub pastwiska prowadzą do utraty bioróżnorodności. Zmiany w strukturze gleby związane z rolnictwem przemysłowym mogą również wpływać na lokalne ekosystemy. Ponadto nadmierne stosowanie antybiotyków w hodowli zwierząt prowadzi do powstania bakterii opornych na leczenie, co stanowi zagrożenie dla zdrowia publicznego. Przez nadmierną uprawę, niewłaściwe zarządzanie polami czy wylesianie rolnictwo przyczynia się do erozji gleby, utraty płodności i zasobów wodnych. Hodowla zwierząt, zwłaszcza przeżuwaczy, jest źródłem emisji metanu związanej z procesami trawiennymi [3].

Aby zmniejszyć wpływ emisji z rolnictwa na zanieczyszczenie środowiska, stosuje się różne metody i praktyki zrównoważonego rolnictwa, takie jak uprawy pokrywowe (np. rośliny, które pokrywają glebę, zmniejszając erozję), właściwe stosowanie nawozów i pestycydów, rotację upraw, integrowane zarządzanie szkodnikami oraz bardziej efektywne wykorzystywanie wody.

3. Powody i efekty redukcji emisji zanieczyszczeń

Widoczny jest związek między poziomem zanieczyszczeń powietrza a zdrowiem społeczeństwa, ze szczególnym uwzględnieniem osób z chorobami układu oddechowego, takimi jak astma czy przewlekła obturacyjna choroba płuc (POCHP). Redukcja emisji zanieczyszczeń zwiększa komfort życia mieszkańców, zwłaszcza osób chorych, dzięki zmniejszeniu częstości i nasilenia objawów takich jak ataki duszności oraz kaszlu. Równocześnie czyste powietrze wpływa na jakość snu, eliminując podrażnienia dróg oddechowych. Dzięki poprawie jakości powietrza może zostać zintensyfikowana aktywność fizyczna, co polepsza ogólną kondycję i zdrowie. Redukcja zanieczyszczeń powietrza zmniejsza ryzyko zaostrzeń chorób układu oddechowego oraz innych schorzeń, poprawiając jakość życia osób chorych i zmniejszając konieczność hospitalizacji [5]. Osoby mieszkające na obszarach o niskiej emisji zanieczyszczeń doświadczają mniejszych problemów zdrowotnych, co przekłada się na ogólny poziom satysfakcji z życia.

Redukcja emisji zanieczyszczeń przekłada się na ochronę środowiska naturalnego, ograniczając ich negatywny wpływ na ekosystemy, w tym roślinność i zwierzęta. Długofalowe strategie redukcji emisji zanieczyszczeń są zgodne z koncepcją zrównoważonego rozwoju, a poprawa jakości powietrza przyczynia się do stworzenia bardziej przyjaznego i komfortowego dla mieszkańców otoczenia miejskiego. Wdrażanie skutecznych polityk ochrony środowiska, inwestowanie w technologie bezpieczne dla atmosfery oraz edukacja społeczeństwa są niezbędne dla osiągnięcia lepszej jakości powietrza [6].

Zrównoważony rozwój oraz technologie przyjazne dla środowiska są kluczowymi elementami ograniczania emisji zanieczyszczeń. Zastosowanie alternatywnych źródeł energii oraz pojazdów elektrycznych wiąże się z wieloma wyzwaniami, które należy uwzględnić, związanymi między innymi – w przypadku samochodów elektrycznych – z produkcją i utylizacją baterii. Niezbędne jest holistyczne podejście do ekologicznego wpływu pojazdów elektrycznych na środowisko, obejmujące cały cykl życia tych pojazdów. Wszelkie działania zapobiegawcze i redukujące emisję zanieczyszczeń powietrza, w tym edukacja społeczeństwa, inwestycje w technologie przyjazne dla środowiska oraz współpraca międzynarodowa w celu skutecznego ograniczenia zanieczyszczeń powietrza, przyczyniają się do stworzenia zdrowszego i bardziej zrównoważonego środowiska życia dla obecnych i przyszłych pokoleń.

Kontynuacja działań na szerszą skalę może prowadzić do ostatecznego wyeliminowania problemu smogu w zanieczyszczonych regionach. Te naukowo uzasadnione inicjatywy są istotne dla poprawy jakości życia mieszkańców, zwłaszcza zdrowia publicznego, oraz stanowią istotny krok w kierunku zrównoważonego rozwoju miejskich obszarów.

4. Podsumowanie

Zmniejszenie częstości i nasilenia objawów chorób układu oddechowego, bezpośrednio związane z poprawą jakości powietrza, przyczynia się do podniesienia jakości życia w ogólności. Również poprawa jakości snu w następstwie poprawy jakości powietrza zwiększa komfort życia. Zmniejszenie ryzyka zaostrzeń chorób przewlekłych jest jednym

z kluczowych aspektów zdrowia publicznego – można je osiągnąć dzięki ochronie środowiska naturalnego oraz zrównoważonemu rozwojowi. Również zwiększenie aktywności fizycznej, któremu sprzyja środowisko o czystym powietrzu, jest istotnym elementem zdrowego stylu życia i rozwoju społecznego. Działania mające na celu poprawę jakości powietrza mają kluczowe znaczenie dla komfortu życia i zdrowia publicznego, wspierając zdrowie mieszkańców, ochronę środowiska naturalnego oraz zrównoważony rozwój społeczeństwa.

Bibliografia

- [1] Kalwar A., Lobur M., Pytel K., Kurdziel F., *Regulation of internal combustion engine operating parameters using MEMS systems*, [w:] *MEMSTECH 2022: IEEE XVIIIth International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design: Polyana, Ukraine, 7–11 September 2022: Proceedings*, IEEE, Piscataway 2022, s. 85–88, <https://doi.org/10.1109/MEMSTECH55132.2022.10002908>.
- [2] Lobur M., Korpyljov D., Jaworski N., Iwaniec M., Marikutsa U., *Arduino based ambient air pollution sensing system*, [w:] *MEMSTECH: 2020 IEEE XVIth International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design: Lviv, April 22–26, 2020: Proceedings*, IEEE, Piscataway 2020, s. 32–35, <https://doi.org/10.1109/MEMSTECH49584.2020.9109460>.
- [3] Figueres C., Le Quéré C., Peters G.P., Whiteman G., Mahindra A., Guan D., *Emissions are still rising: ramp up the cuts*, *Nature*, 2018, vol. 564(7734), s. 27–30, <https://doi.org/10.1038/d41586-018-07585-6>.
- [4] Pytel K., Hudy W., Kurdziel F., Kalwar A., Gumula S., Soliman M.H., *Application of correlation analysis for impact assessment of air quality on the possibility of using chosen source of renewable energy*, [w:] *MEMSTECH: 2020 IEEE XVIth International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design: Lviv, April 22–26, 2020: Proceedings*, IEEE, Piscataway 2020, s. 17–21, <https://doi.org/10.1109/MEMSTECH49584.2020.9109502>.
- [5] Gaska K., Generowicz A., Lobur M., Jaworski N., Ciula J., Mzyk T., *Optimization of biological wastewater treatment process by hierarchical adaptive control*, [w:] *MEMSTECH: 2019 IEEE XVth International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design: Polyana, Ukraine, May 22–26, 2019: Proceedings*, IEEE, Piscataway 2019, s. 119–122, <https://doi.org/10.1109/MEMSTECH.2019.8817382>.
- [6] Pytel K., Melnyk M., Hudy W., Kurdziel F., Kalwar A., Gumula S., *Predicting the use of solar photovoltaic panels for generating electricity in the area with air pollution*, [w:] *MEMSTECH: 2020 IEEE XVIth International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design: Lviv, April 22–26, 2020: Proceedings*, IEEE, Piscataway 2020, s. 107–110, <https://doi.org/10.1109/MEMSTECH49584.2020.9109449>.
- [7] Jackson R.B., Le Quéré C., Andrew R.M., Canadell J.G., Korsbakken J.I., Liu Z., Peters G.P., Zheng B., *Global energy growth is outpacing decarbonization*, *Environmental Research Letters*, 2018, vol. 13(12), nr art. 120401, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaf303>.

-
- [8] Hudy W., Piaskowska-Silarska M., Pytel K., Gumula S., Marikutsa U., Farmaha I., *Application of evolutionary algorithms to analysis the possibilities of wind energy use*, [w:] Kot A., Nawrocka A. (eds.), *ICCC 2019: Proceedings of the 2019 20th International Carpathian Control Conference: Kraków – Wieliczka, May 26–29, 2019*, IEEE, Piscataway 2019, s. 1–7, <https://doi.org/10.1109/CarpathianCC.2019.8765953>.
- [9] Battista G., Pagliaroli T., Mauri L., Basilicata C., De Lieto Vollaro R., *Assessment of the air pollution level in the city of Rome (Italy)*, *Sustainability*, 2016, vol. 8(9), nr art. 838, <https://doi.org/10.3390/su8090838>.

TRENDY ZANIECZYSZCZENIA POWIETRZA NA OBSZARZE MIEJSKIM NA PODSTAWIE DANYCH ZE STACJI POMIAROWYCH

Krzysztof Pytel¹, Henryk Noga², Andriy Zdobytskyi³

¹ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Katedra Systemów Energetycznych i Urządzeń Ochrony Środowiska, Kraków, Polska

² Uniwersytet Komisji Edukacji Narodowej w Krakowie, Instytut Nauk Technicznych, Katedra Edukacji Technicznej i Informatycznej, Kraków, Polska

³ Uniwersytet Narodowy Politechnika Lwowska, Katedra Systemów Projektowania Wspomagającego Komputerowo, Lwów, Ukraina

e-mail: krzysztof.pytel@agh.edu.pl, henryk.noga@up.krakow.pl, andrii.y.zdobytskyi@lpnu.ua

Słowa kluczowe: poprawa jakości powietrza, redukcja emisji zanieczyszczeń, ekologiczne źródła ciepła, czynniki klimatyczne, PM2.5, PM10, analiza trendów

Streszczenie: W publikacji przeprowadzono analizę trendów zanieczyszczenia powietrza na obszarze miejskim z wykorzystaniem danych ze stacji pomiarowych. Analizy koncentrowały się na wpływie na jakość powietrza na obszarze miejskim czynnika klimatycznego (temperatury otoczenia) oraz czynnika społecznego (wprowadzenia zakazu spalania paliw stałych). Analiza obejmuje okres 13 lat, dzięki czemu umożliwia identyfikację długoterminowych trendów zanieczyszczenia powietrza oraz ich związku ze zmianami w regulacjach dotyczących emisji oraz z zachowaniami społeczeństwa. Pokazano tendencje zanieczyszczenia powietrza w kontekście zmieniających się warunków klimatycznych i działań podejmowanych przez władze lokalne mających na celu poprawę jakości powietrza na obszarach miejskich. Badanie to stanowi wkład w prowadzone analizy czynników wpływających na jakość powietrza miejskiego i może być użyteczne dla decydentów oraz badaczy zajmujących się ochroną środowiska.

1. Wprowadzenie

W perspektywie rozwoju światowej gospodarki nadal przewiduje się wzrost konsumpcji węgla, pomimo podejmowanych przez wiele państw działań mających na celu przejście na bardziej zrównoważone źródła energii. Węgiel nadal pozostaje niewralgicznym czynnikiem napędzającym rozwój gospodarczy w krajach rozwijających się, chociaż związane

z nim zagrożenia dla środowiska i zdrowia skłoniły wiele państw do poszukiwania alternatywnych źródeł energetycznych. Niemniej jednak wycofanie się z węgla stawia przed nami znaczne wyzwania, zwłaszcza w regionach, gdzie przemysł węglowy stanowi źródło utrzymania. Zielone inwestycje, postęp technologiczny i dobrze zaprojektowane polityki są uznawane za niezbędne narzędzia w procesie przejścia na czystsze źródła energii oraz przyczyniają się łagodzenia negatywnych skutków dla społeczności uzależnionych od węgla. Węgiel jest traktowany jako główne źródło zanieczyszczeń i zmian klimatycznych, ponieważ emitując podczas spalania duże ilości CO₂ i innych szkodliwych substancji do atmosfery, przyczyniał się do efektu cieplarnianego i powstawania kwaśnego deszczu. Ponadto węgiel to również źródło emisji związków stanowiących zagrożenie dla zdrowia ludzkiego i ekosystemów, takich jak dwutlenek siarki, tlenki azotu, lotne substancje organiczne (VOCs) oraz pyły zawieszone. Te substancje zanieczyszczają powietrze i prowadzą do szeregu problemów zdrowotnych, w tym chorób układu oddechowego, alergii oraz chorób serca i układu krążenia [1]. Dlatego ograniczenie i stopniowe wycofywanie się ze spalania węgla stanowi krok milowy w kierunku poprawy jakości powietrza i ochrony środowiska naturalnego. Krok ten podejmują głównie kraje rozwinięte i to głównie tam jest obserwowany spadek konsumpcji węgla. Ze względu na obawy dotyczące bezpieczeństwa energetycznego, elektryfikację i szybki wzrost gospodarczy w krajach rozwijających się konieczne jest znalezienie zrównoważonych i ekologicznych alternatyw dla węgla jako głównego źródła energii. Optymalnym rozwiązaniem jest inwestowanie w odnawialne źródła energii, takie jak energetyka słoneczna, wiatrowa i geotermalna, które są czyste i nie emitują szkodliwych substancji. Ponadto rozwój efektywnych technologii magazynowania energii, które umożliwiają przechowywanie wyprodukowanych nadwyżek, może przyczynić się do stabilizacji dostaw w przypadku fluktuacji energii generowanej przez źródła odnawialne. Wprowadzenie inteligentnych systemów zarządzania energią oraz zachęty do jej oszczędzania w gospodarstwach domowych i przemyśle mogą również się przyczynić do ograniczenia zapotrzebowania na energię, zmniejszając tym samym potrzebę korzystania z węgla. Dążenie do zrównoważonego rozwoju, który uwzględnia ekologiczne aspekty, jest krokiem w kierunku tworzenia bardziej ekologicznego i bezpiecznego dla środowiska modelu energetycznego [2].

Obecnie jeszcze wiele czynników utrudnia wycofanie się ze spalania paliw stałych. W krajach rozwijających się węgiel jako źródło energii w zastosowaniach przemysłowych jest trudny do zastąpienia. Elektrownie węglowe mają długi okres użytkowania, a rezygnacja z tego paliwa często prowadzi do ogromnych strat ekonomicznych dla przemysłu górniczego i zatrudnionych w tym sektorze. Pokonanie tych wyzwań wymaga skutecznych polityk ochrony środowiska oraz dostępności tańszych źródeł energii. Niemniej jednak najważniejsze jest uwzględnienie obaw górników i pracowników zależnych od przemysłu wydobywczego, co wymaga realnych rozwiązań i wdrożenia polityk zapewniających elastyczną ścieżkę kariery (w tym możliwość przekwalifikowania) oraz zapobiegających negatywnym skutkom społecznym takiej restrukturyzacji. Ważną rolę w krajach rozwijających się i krajach o niskich dochodach może odgrywać międzynarodowe wsparcie finansowe i techniczne. Konieczne jest jednak kompleksowe podejście do problemu zanieczyszczenia powietrza, które łączy w sobie środki polityczne, innowacje technologiczne i międzynarodową współpracę, aby skutecznie wycofać się z węgla i wspierać bardziej ekologiczną przyszłość [3].

Współczesne miasta stanowią obszary intensywnej działalności przemysłowej, transportowej i komercyjnej, co często prowadzi do znacznego zanieczyszczenia powietrza. W publi-

kacji analizowano zmiany jakości powietrza na wybranym obszarze miejskim, skupiając się na danych ze stacji pomiarowych. Celem jest zidentyfikowanie trendów zanieczyszczenia powietrza oraz zrozumienie roli czynników wpływających na ich kształtowanie [4].

2. Wykorzystanie danych ze stacji pomiarowych do analizy zanieczyszczenia powietrza

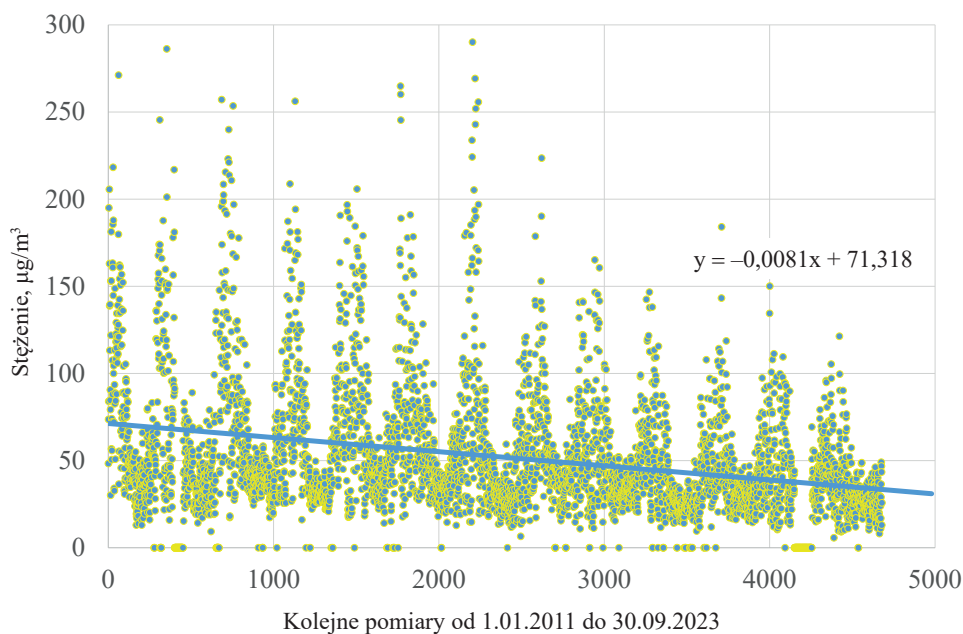
Dane ze stacji pomiarowych pozwalają na dogłębne scharakteryzowanie jakości powietrza w danym regionie. Dzięki systematycznemu gromadzeniu informacji o stężeniach substancji takich jak PM_{2.5}, PM₁₀, tlenki azotu (NO_x) i dwutlenek siarki (SO₂) oraz ich analizie można zidentyfikować wzorce i tendencje zanieczyszczenia powietrza. To umożliwia monitorowanie różnych czynników, takich jak sezonowe zmiany jakości powietrza oraz wpływ emisji komunikacyjnych czy przemysłowych na jakość powietrza na danym obszarze miejskim. Takie badania umożliwiają podejmowanie decyzji dotyczących oceny jakości środowiska, oddziaływania na środowisko i zdrowia publicznego oraz opracowywanie skutecznych strategii ograniczania emisji i poprawy jakości życia mieszkańców. W badaniach wykorzystano dane ze stacji pomiarowych rozmieszczonych na obszarze miejskim. Dane dotyczące stężeń zanieczyszczeń powietrza obejmują PM_{2.5}, PM₁₀, NO_x i SO₂. Zastosowano techniki analizy umożliwiające zidentyfikowanie tendencji zmian [5].

Opracowanie danych pomiarowych zostało podzielone na kilka etapów, aby umożliwić kompleksową analizę jakości powietrza w badanym regionie. Dane zebrano i dla każdego roku przedstawiono je w formie wykresu prezentującego wartości dobowego zanieczyszczenia powietrza [6]. Przygotowano wykresy porównawcze, które umożliwiają dokładne prześledzenie zmienności wskaźników jakości powietrza na przestrzeni lat 2011–2023. Te porównania pozwalają zidentyfikować ewentualne wzorce i tendencje w dłuższym okresie. Dzięki zestawianiu danych z różnych lat można ocenić, czy jakość powietrza ulega poprawie, pogorszeniu, czy pozostaje na stałym poziomie. To z kolei pozwala na oszacowanie dynamiki zmian parametrów decydujących o zanieczyszczeniu powietrza na danym obszarze miejskim [7].

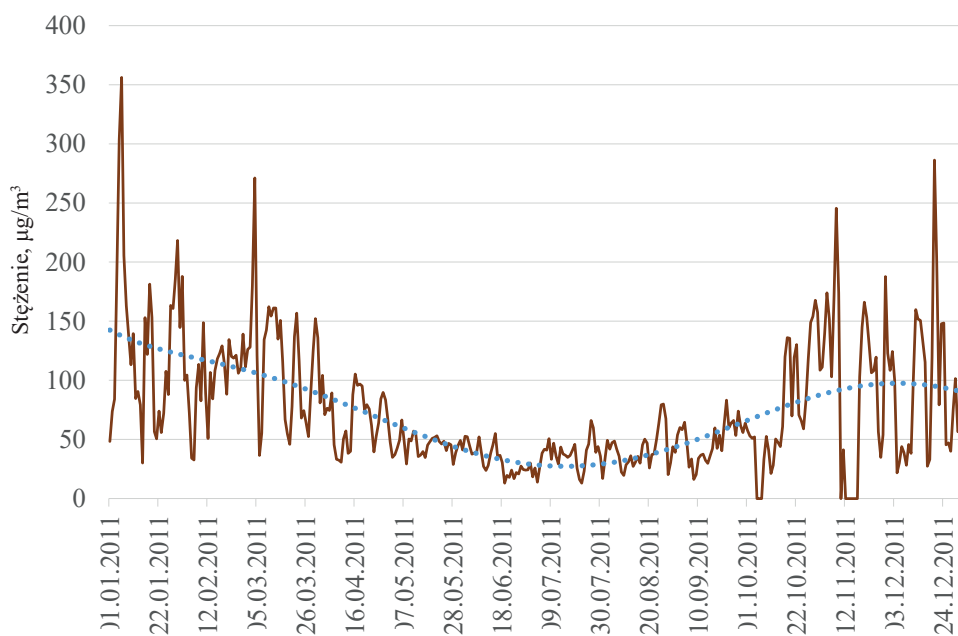
Takie kompleksowe podejście do opracowania danych pomiarowych umożliwia nie tylko ocenę bieżącej sytuacji, ale także prognozowanie przyszłych trendów zanieczyszczenia powietrza. To z kolei pozwala na podejmowanie świadomych decyzji dotyczących ochrony środowiska i zdrowia publicznego oraz implementacji skutecznych strategii ograniczania emisji, które mają na celu poprawę jakości życia mieszkańców w perspektywie długoterminowej [8].

2.1. Średniodobowe wartości stężenia zanieczyszczeń

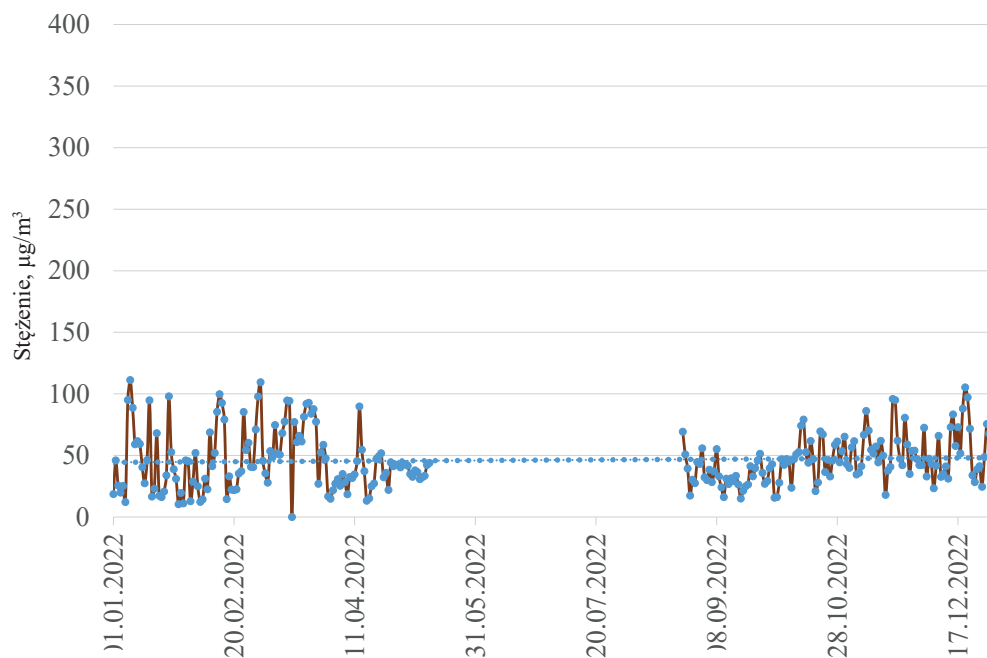
W ramach badania analizowano średniodobowe wartości stężenia zanieczyszczeń powietrza w latach 2011–2023. Stanowią one istotny wskaźnik jakości powietrza, ponieważ odzwierciedlają średnie poziomy zanieczyszczeń, na które są narażeni mieszkańcy danego obszaru przez całą dobę, co pokazano na rysunku 1. W 2011 roku wartości PM₁₀ zmieniały się sezonowo, przy czym linia trendu wskazuje niższe wartości zanieczyszczeń na końcu niż na początku roku (rys. 2).



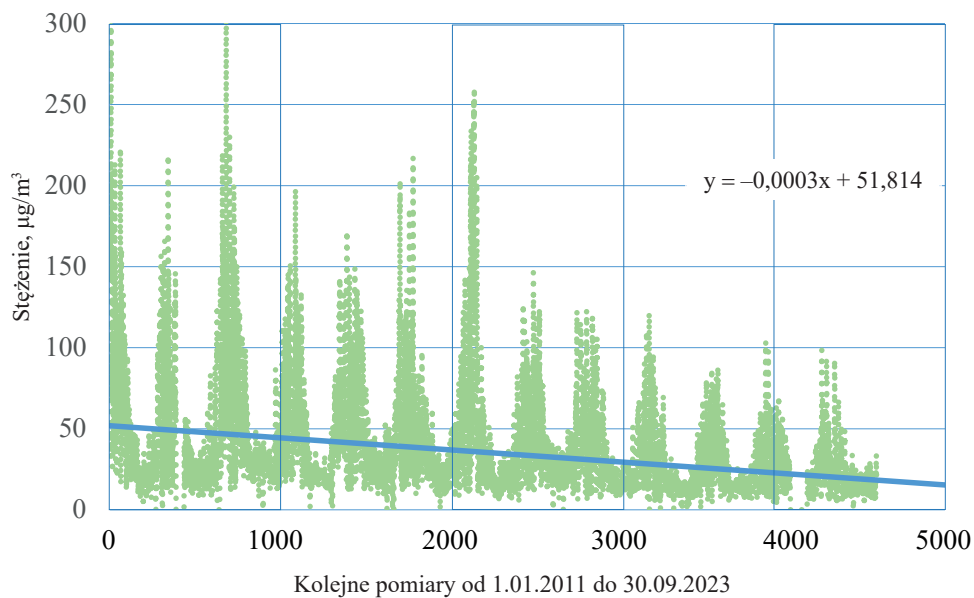
Rys. 1. Stężenia PM10 w latach 2011–2023 na analizowanym obszarze miejskim, linia trendu i równanie linii trendu



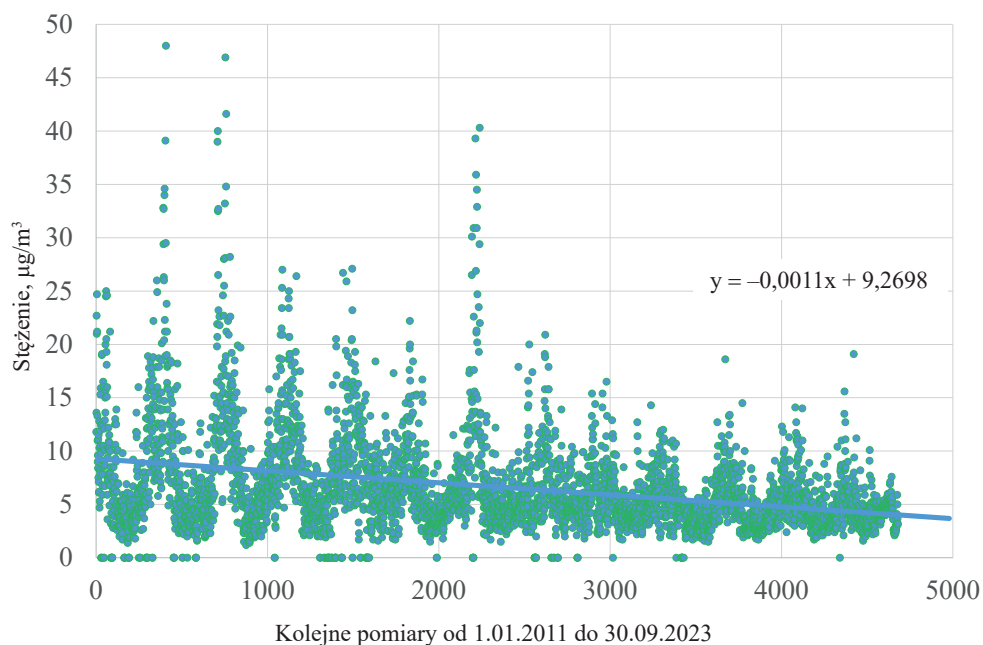
Rys. 2. Stężenia PM10 w 2011 roku na analizowanym obszarze miejskim



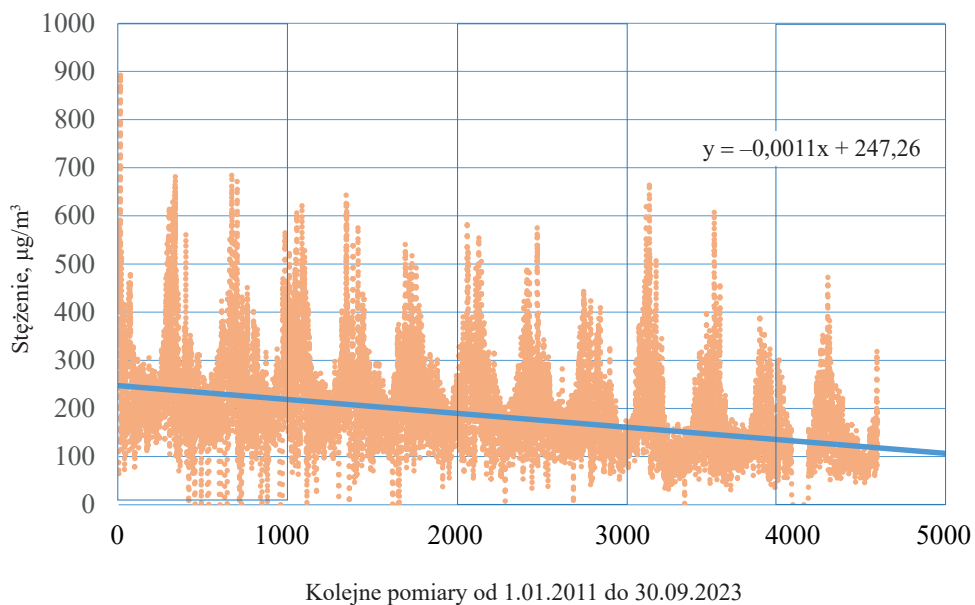
Rys. 3. Stężenia PM10 w 2022 roku na analizowanym obszarze miejskim



Rys. 4. Stężenia PM2.5 w latach 2011–2023, linia trendu i równanie linii trendu



Rys. 5. Stężenia SO_2 w latach 2011–2023, linia trendu i równanie linii trendu



Rys. 6. Stężenia NO_x w latach 2011–2023, linia trendu i równanie linii trendu

W przypadku danych z 2022 roku (rys. 3) analiza wykazała, że średniodobowe wartości stężeń zanieczyszczeń były na względnie stałym poziomie. Wyniki te sugerują pewną stabilność jakości powietrza w tym okresie, choć wartości te mogą mieć różnice sezonowe i cykliczne. Natomiast w roku 2023 zaobserwowano istotne zmiany w średniodobowych wartościach stężenia zanieczyszczeń. W porównaniu z rokiem 2011 odnotowano wyraźny spadek poziomów zanieczyszczeń powietrza. To zjawisko wynika z różnych czynników, takich jak zakaz stosowania paliw stałych, zmiana liczby pojazdów na drogach, zmiana aktywności przemysłowej czy zmiana warunków meteorologicznych (temperatura, ciśnienie atmosferyczne, wilgotność, prędkość i kierunek wiatru czy opady atmosferyczne), które tworzą kompleksowy zespół czynników wpływających na ilość i jakość zanieczyszczeń atmosferycznych [9].

Stężenia PM_{2.5} na przestrzeni analizowanych lat, linię trendu i jej równanie zaprezentowano na rysunku 4. Można oszacować, że po 2016 roku stężenie zanieczyszczeń wyraźnie maleje. Stężenia SO₂ w analizowanym okresie, linię trendu i jej równanie przedstawiono na rysunku 5. Można oszacować, że po 2019 roku stężenie zanieczyszczeń wyraźnie maleje. Stężenia NO_x w latach 2011–2023, linię trendu i jej równanie zaprezentowano na rysunku 6. Można oszacować, że po 2019 roku stężenie zanieczyszczeń wyraźnie maleje.

Policzono również korelację Pearsona dla wybranych danych. Wyniki zawarto w tabeli 1. Z definicji wartości korelacji mieszczą się w przedziale od –1 do 1. Korelacja bliska 1 oznacza silny dodatni związek, czyli wzrost jednej zmiennej jest ściśle związany ze wzrostem drugiej zmiennej. Korelacja bliska –1 oznacza silny ujemny związek, czyli wzrost jednej zmiennej jest ściśle związany ze spadkiem drugiej zmiennej. Korelacja bliska 0 oznacza brak związku lub bardzo słaby związek między zmiennymi.

Tabela 1. Współczynniki korelacji Pearsona dla wybranych danych

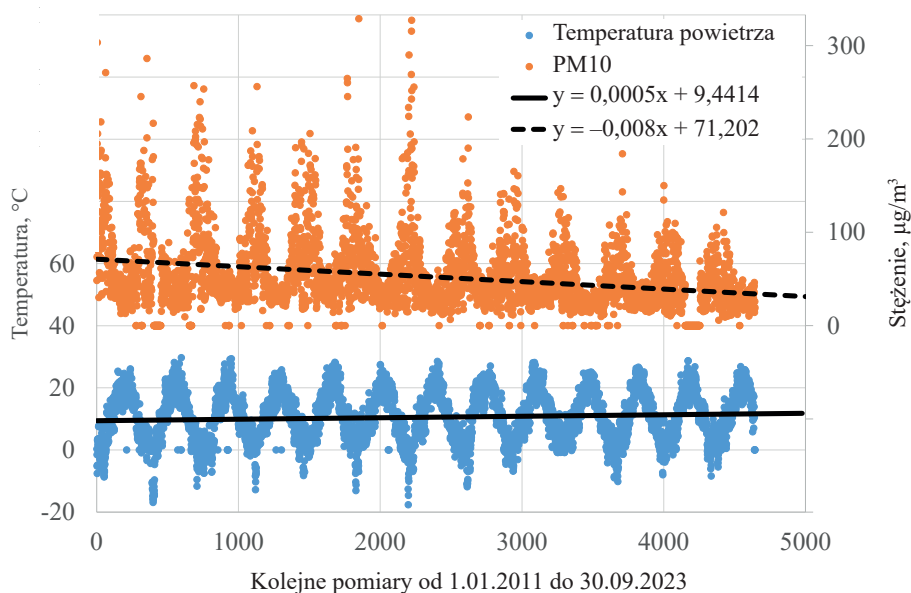
	Ciśnienie powietrza	Tempera- tura powietrza	Wilgot- ność względna	Średnia prędkość wiatru	Kierunek wiatru	PM10	SO ₂
Ciśnienie powietrza	1						
Temperatura powietrza	–0,042	1					
Wilgotność względna	0,044	–0,334	1				
Średnia prędkość wiatru	–0,023	–0,128	–0,091	1			
Kierunek wiatru	–0,002	0,069	–0,019	0,024	1		
PM10	0,029	–0,423	0,158	–0,089	–0,093	1	
SO ₂	0,030	–0,430	0,113	0,043	–0,064	0,508	1

Policzona niezależnie od innych danych korelacja Pearsona dla NO_x i PM_{2.5} wyniosła 0,01, co pokazuje, że zmiany analizowanych zanieczyszczeń powietrza nie są związane ze sobą, czyli istnieje bardzo słaby pozytywny związek między poziomami analizowanych

zanieczyszczeń. Oznacza to, że w miarę wzrostu jednej zmiennej druga zmienna także nieznacznie wzrasta, ale związek ten jest zaniedbywalny, ponieważ wartość ta jest bardzo bliska zeru.

Najwyższa wartość korelacji, wynosząca 0,508, pomiędzy PM10 a SO₂ wskazuje na umiarkowany dodatni związek między tymi dwiema zmiennymi. Wartość korelacji jest większa od zera, co oznacza, że istnieje pozytywny związek między poziomem PM10 a SO₂; gdy poziom SO₂ rośnie, poziom PM10 również zazwyczaj rośnie, i odwrotnie. Jednakże wartość korelacji nie jest wystarczająco wysoka, aby uznać ten związek za bardzo silny. Można to zinterpretować jako umiarkowanie pozytywny związek, ale nadal istnieją inne czynniki, które również wpływają na obie te zmienne.

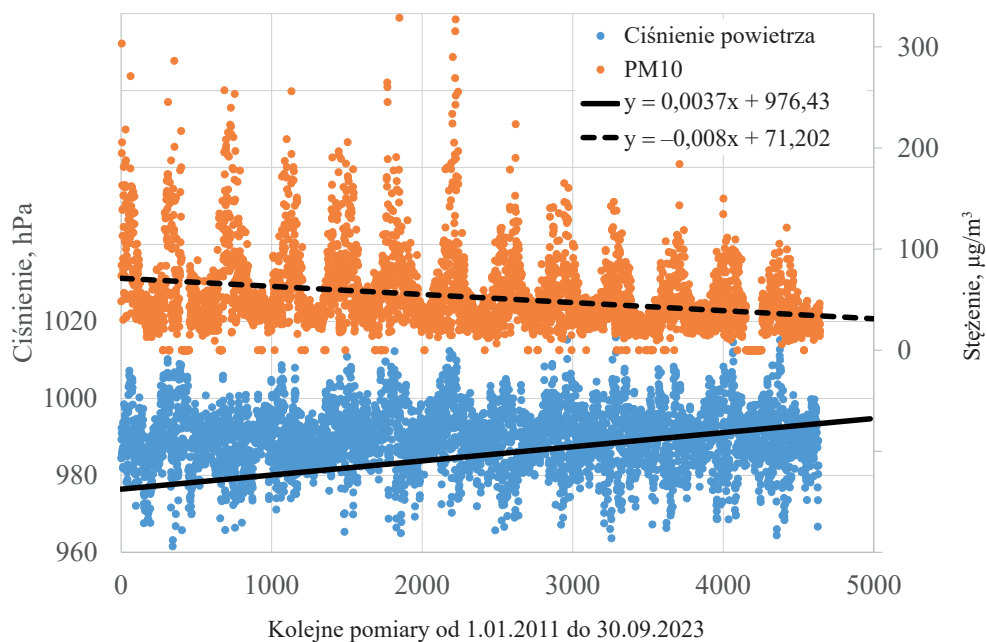
Na rysunkach 7–9 przedstawiono porównanie wybranych czynników klimatycznych w aspekcie zanieczyszczenia PM10. Na rysunku 7 widać wyraźnie obniżenie stężenia PM10 oraz nieznaczny wzrost średniej dobowej temperatury powietrza na przestrzeni lat. Spadek stężenia PM10 mógł więc być spowodowany niewielkim wzrostem średniej temperatury, ale bardziej prawdopodobne są tu działania społeczne, których efektem był zakaz spalania paliw stałych na analizowanym obszarze, co zresztą potwierdza współczynnik korelacji Pearsona na poziomie -0,423.



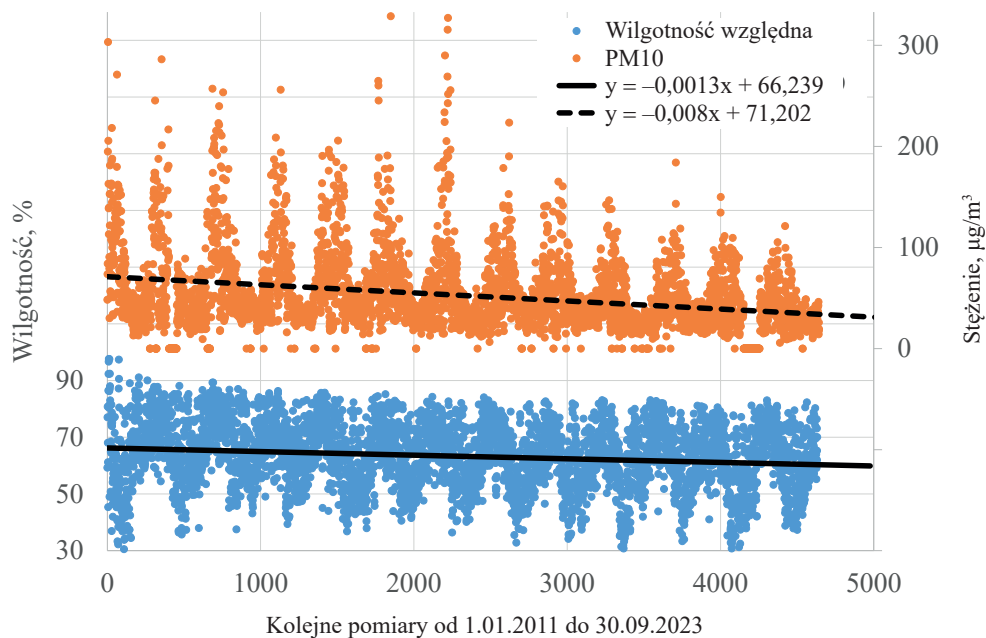
Rys. 7. Stężenia PM10 w zestawieniu ze średnią dobową temperaturą powietrza na przestrzeni lat, linia trendu i równanie linii trendu

Na rysunku 8 widać wyraźnie obniżenie stężenia PM10 oraz nieznaczny wzrost średniej dobowej ciśnienia powietrza na przestrzeni lat. Związku pomiędzy spadkiem stężenia PM10 a wzrostem ciśnienia powietrza nie potwierdza współczynnik korelacji Pearsona, który obliczono na poziomie 0,029.

Na rysunku 9 widać wyraźnie obniżenie stężenia PM10 oraz nieznaczny spadek średniej dobowej wilgotności względnej na przestrzeni lat. Brak istotnego związku pomiędzy spadkami stężenia PM10 i wilgotności względnej potwierdza współczynnik korelacji Pearsona, który obliczono na poziomie 0,158.



Rys. 8. Stężenia PM10 w zestawieniu ze średnią dobową ciśnienia powietrza



Rys. 9. Stężenia PM10 w zestawieniu ze średnią dobową wilgotności względnej

Podsumowując przeprowadzone badania, można zauważyć, że badanie przeprowadzone w latach 2011–2023 analizowało średniodobowe wartości stężenia zanieczyszczeń powietrza na obszarze miejskim, a wyniki uzyskane w badaniu wskazały, że obecność PM10 w atmosferze stanowi wskaźnik odzwierciedlający średnie poziomy zanieczyszczeń, na które są narażeni mieszkańcy przez całą dobę. Analiza PM10 pokazała sezonowe zmiany zawartości tego zanieczyszczenia z niższymi wartościami w okresie zimowym. W 2022 roku obserwowano stosunkowo stałe wartości stężenia, świadczące o pewnej stabilności, a w 2023 roku odnotowano dalszy znaczący spadek zanieczyszczeń, co może stanowić konsekwencję zakazu stosowania paliw stałych. Analizy korelacji wykazały, że zmiany w stężeniu PM2.5 i NO_x nie są istotnie powiązane. Spalanie paliw w pojazdach silnikowych jest jednym z głównych źródeł emisji NO₂. Istnieje natomiast umiarkowany dodatni związek między PM10 a SO₂. Głównym źródłem dwutlenku siarki (SO₂) w atmosferze jest działalność człowieka, zwłaszcza spalanie paliw kopalnych. Badania wykazują, że wprowadzenie ograniczeń spalania paliw stałych miało decydujący wpływ na jakość powietrza, co dowodzi znaczenia działań regulacyjnych dla poprawy jakości powietrza na obszarach miejskich.

3. Podsumowanie

Analiza przedstawionych danych umożliwia identyfikację trendów i zmian w jakości powietrza na badanym obszarze miejskim między rokiem 2011 a 2023. Pozwala to na lepsze zrozumienie dynamiki zmian w poziomach zanieczyszczeń powietrza, co może być użyteczne dla decydentów w podejmowaniu środków zaradczych w celu poprawy jakości powietrza i ochrony zdrowia mieszkańców. Dodatkowo analiza ta może stanowić podstawę dalszych badań nad przyczynami tych zmian oraz ich wpływem na środowisko i społeczeństwo.

Bibliografia

- [1] Kalwar A., Lobur M., Pytel K., Kurdziel F., *Regulation of Internal Combustion Engine Operating Parameters Using MEMS Systems*, [w:] *MEMSTECH 2022: IEEE XVIIIth International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design: Polyana, Ukraine, 7–11 September 2022: Proceedings*, IEEE, Piscataway 2022, s. 85–88, <https://doi.org/10.1109/MEMSTECH55132.2022.10002908>.
- [2] Lobur M., Korpyljov D., Jaworski N., Iwaniec M., Marikutsa U., *Arduino Based Ambient Air Pollution Sensing System*, [w:] *MEMSTECH: 2020 IEEE XVIth International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design: Lviv, April 22–26, 2020: Proceedings*, IEEE, Piscataway 2020, s. 32–35, <https://doi.org/10.1109/MEMSTECH49584.2020.9109460>.
- [3] Figueres C., Le Quéré C., Mahindra A., Bäte O., Whiteman G., Peters G., *Emissions are still rising: ramp up the cuts*, *Nature*, 2018, vol. 564(7734), s. 27–30, <https://doi.org/10.1038/d41586-018-07585-6>.

- [4] Pytel K., Hudy W., Kurdziel F., Kalwar A., Gumula S., Soliman M.H., *Application of correlation analysis for impact assessment of air quality on the possibility of using chosen source of renewable energy*, [w:] *MEMSTECH: 2020 IEEE XVIth International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design: Lviv, April 22–26, 2020: Proceedings*, IEEE, Piscataway 2020, s. 17–21, <https://doi.org/10.1109/MEMSTECH49584.2020.9109502>.
- [5] Gaska K., Generowicz A., Lobur M., Jaworski N., Ciula J., Mzyk T., *Optimization of biological wastewater treatment process by hierarchical adaptive control*, [w:] *MEMSTECH: 2019 IEEE XVth International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design: Polyana, Ukraine, May 22–26, 2019: Proceedings*, IEEE, Piscataway 2019, s. 119–122, <https://doi.org/10.1109/MEMSTECH.2019.8817382>.
- [6] Pytel K., Melnyk M., Hudy W., Kurdziel F., Kalwar A., Gumula S., *Predicting the use of solar photovoltaic panels for generating electricity in the area with air pollution*, [w:] *MEMSTECH: 2020 IEEE XVIth International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design: Lviv, April 22–26, 2020: Proceedings*, IEEE, Piscataway 2020, s. 107–110, <https://doi.org/10.1109/MEMSTECH49584.2020.9109449>.
- [7] Jackson R.B., Le Quéré C., Andrew R.M., Canadell J.G., Korsbakken J.I., Liu Z., Peters G.P., Zheng B., *Global energy growth is outpacing decarbonization*, *Environmental Research Letters*, vol. 13(12), 2018, nr art. 120401, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaf303>.
- [8] Hudy W., Piaskowska-Silarska M., Pytel K., Gumula S., Marikutsa U., Farmaha I., *Application of evolutionary algorithms to analysis the possibilities of wind energy use*, [w:] Kot A., Nawrocka A. (eds.), *ICCC 2019: Proceedings of the 2019 20th International Carpathian Control Conference: Kraków – Wieliczka, May 26–29, 2019*, IEEE, Piscataway 2019, s. 1–7, <https://doi.org/10.1109/CarpathianCC.2019.8765953>.
- [9] Battista G., Pagliaroli T., Mauri L., Basilicata C., De Lieto Vollaro R., *Assessment of the Air Pollution Level in the City of Rome (Italy)*, *Sustainability*, 2016, vol. 8(9), nr art. 838, <https://doi.org/10.3390/su8090838>.

