

**RAPORT ROCZNY Z MONITORINGU
WYBRANYCH „HOT-SPOTÓW”
Sezon grzewczy 2025/2026**

Zabrze, 2026



Poradnik przygotowany przez Instytut Technologii Paliw i Energii w ramach projektu zintegrowanego LIFE „**Śląskie. Przywracamy błękit**”. **Kompleksowa realizacja Programu ochrony powietrza dla województwa śląskiego** realizowanego jest przy dofinansowaniu z Programu LIFE Unii Europejskiej oraz Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej



Województwo
Śląskie



Projekt zintegrowany LIFE „**Śląskie. Przywracamy błękit**”. **Kompleksowa realizacja Programu ochrony powietrza dla województwa śląskiego** realizowany jest przy dofinansowaniu z Programu LIFE Unii Europejskiej oraz Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej.

LIFE20 IPE/PL/000007 – LIFE-IP AQP-SILESIA-SKY

Wyłączną odpowiedzialność za treść publikacji ponoszą autorzy. Informacje zawarte w niniejszej broszurze niekoniecznie odzwierciedlają stanowisko lub opinie Komisji Europejskiej, która nie odpowiada za skutki związane z użyciem informacji w niej zawartych.

1	WSTĘP	4
2	METODYKA POMIARÓW	7
2.1	POMIARY Z WYKORZYSTANIEM DRONÓW	7
2.2	POMIARY STACJONARNE	8
3	WYNIKI KAMPANII POMIAROWEJ.....	10
4	OCENA PRZEPROWADZONYCH POMIARÓW W ODNIESIENIU DO STANU BAZOWEGO W „HOT-SPOTACH”	33
5	PODSUMOWANIE.....	37

1 Wstęp

Niniejsze opracowanie przedstawia zestawienie wyników pomiarów uzyskanych w wyniku realizacji dwóch zadań Poddziałania C.2.1. Monitoring zanieczyszczeń pyłowych PM10 z wykorzystaniem dronów na obszarach występowania tzw. „hot-spotów” związanych z niską emisją w sezonie grzewczym 2025/2026:

- ❖ wybiórczego pomiaru względnej wielkości stężeń PM10 (w odniesieniu do CO₂) w gazach spalinowych nad emitarami indywidualnymi w obrębie wytypowanych „hot-spotów”,
- ❖ ciągłych pomiarów stężeń pyłu PM10 przez urządzenia stacjonarne zainstalowane w wybranych punktach „hot-spotów”.

Monitoring zawartości PM10 w spalinach i w powietrzu z wykorzystaniem dronów oraz mierników stacjonarnych na obszarach występowania „hot-spotów” pyłu zawieszanego (lokalnych maksimów stężeń) związanych z eksploatacją indywidualnych urządzeń grzewczych na paliwa stałe, pozwoli na bieżącą kontrolę postępu wdrażania działania naprawczego PL240X-ZSO. W jego ramach przewidziano wymianę przestarzałych, wysokoemisyjnych źródeł ciepła na paliwa stałe na źródła niskoemisyjne.

W trakcie trwania projektu w ramach wybiórczych pomiarów względnych stężeń PM10 mierzone są wartości stężeń chwilowych PM10 i CO₂ nad emitarami w wybranych „hot-spotach” w 10 gminach woj. śląskiego, a następnie wyliczane stosunki CO₂/PM10 uzyskanych stężeń. Dodatkowo sporządzone są mapy przelotu drona nad wytypowanymi „hot-spotami”. Okres trwania projektu obejmuje 6 lat - w jego trakcie cykle pomiarowe będą wykonywane 5-krotnie, przy czym pierwszy cykl ma charakter pomiaru bazowego – zapewniającego dane wyjściowe do oceny spadku emisji.

Dwutlenek węgla, do którego odnoszone są stężenia PM10, stanowi poziom odniesienia dostarczający przybliżonej informacji o mocy źródła, przy stężeniu zmieniającym się w zależności od odległości od emitora i parametrów meteorologicznych w sposób niemal identyczny jak PM10. W rezultacie iloraz stężeń CO₂ i PM10 w nieznacznym tylko stopniu zależy od mocy źródła, od temperatury powietrza i innych zmiennych czynników meteorologicznych (siła i kierunek wiatru, wilgotność powietrza, wysokość warstwy mieszania itp.), nie zmienia się także w zależności od położenia punktu pomiaru względem emitora i osi strumienia spalin (w przyjętym zakresie odległości), zależy natomiast od jakości prowadzenia procesu

spalania i wielkości związanej z tym emisji pyłów. Podobne zależności mają miejsce podczas spalania biopaliw stałych.

Monitoring dronowy prowadzony zgodnie z metodyką ITPE obejmuje pomiar zanieczyszczeń w smudze spalin emitowanych z budynków mieszkalnych. Metodyka ta pozwala na uniezależnienie mierzonych stężeń pyłu od mających na nie silny wpływ parametrów meteorologicznych, jak też stopnia obciążenia urządzeń grzewczych. Można ją stosować w związku z tym do obiektywnej oceny zmian wielkości emisji z urządzeń grzewczych.

Zgromadzone dane, wraz z danymi pozyskanymi w kolejnych latach trwania projektu, umożliwią wykonanie działań pozwalających na monitorowanie dynamiki zmian emisji pyłów pochodzących ze źródeł ciepła zlokalizowanych na obszarze „hot-spotu”.

W przypadku wykrycia w spalinach gazów świadczących o współspalaniu odpadów, będą o tym natychmiast informowane odpowiednie dla danego rejonu służby mające uprawnienia do przeprowadzenia bezpośredniej kontroli źródła emisji i kotłowni.

Pojedynczy pomiar dla każdego emitora będzie skutkował obliczeniem wskaźnika PDW (stosunek CO₂ do PM₁₀). Wskaźnik ten w postaci 5 wartości dla każdego „hot-spotu”, odpowiadających kolejnym latom pomiarowym, będzie wykorzystany do:

- ❖ przedstawienia statystyki opisowej charakteryzującej każdy hot-spot,
- ❖ dokonania porównania poszczególnych hot spotów pod kątem średniego stężenia PM₁₀,
- ❖ ilościowej (procentowej) oceny zmiany stężeń pyłu PM₁₀ (wzrost/spadek) dla każdego „hot-spotu” w okresie 5-letnim,
- ❖ oszacowania efektu ekonomicznego wprowadzanych na terenie „hot-spotów” zmian w postaci stosunku nakładów do uzyskanego spadku wskaźnika PDW (w tym celu wymagane są dodatkowe informacje nt. wymiany źródeł emisji w hot spotach).

Opisane loty pomiarowe dronem posiadają także efekty niemierzalne o charakterze informacyjno-edukacyjnym, obejmujące:

- ❖ podniesienie kompetencji służb kontrolnych odpowiedzialnych na realizację kontroli indywidualnych urządzeń grzewczych w zakresie wykrywania procederu nielegalnego spalania lub współspalania odpadów oraz przestrzegania przepisów uchwały antysmogowej

w zakresie eksploatowanych urządzeń grzewczych i spalanych paliw stałych,

- ❖ określenie, w cyklu corocznym, stopnia redukcji poziomu stężeń zanieczyszczeń w „hot spotach” w odniesieniu do założeń redukcyjnych wskazanych w POP 2020,
- ❖ wskazanie obszarów wymagających, w pierwszej kolejności, intensyfikacji działań na rzecz ograniczania niskiej emisji,
- ❖ zwiększenie świadomości mieszkańców województwa śląskiego w zakresie oddziaływania indywidualnych urządzeń grzewczych na jakość powietrza w bezpośrednim sąsiedztwie ich domów, poprzez prezentację danych dotyczących zmierzonych stężeń pyłu w gazach spalinowych.

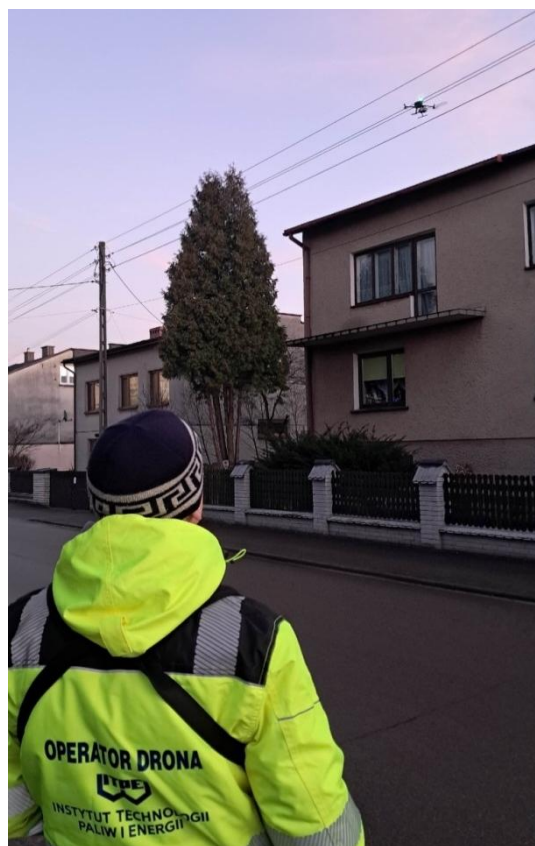
Drugie z realizowanych działań, obejmujące ciągłe pomiary stężeń pyłu PM10 przez urządzenia stacjonarne zainstalowane w wybranych punktach „hot-spotów”, realizuje wprost monitoring jakości powietrza pod kątem stężenia pyłu PM10. Biorąc pod uwagę specyficzne miejsca (obszary o dużym ruchu osób, często przy uczęszczanych obiektach użyteczności publicznej)) i wysokości ulokowania mierników (2 – 4 m nad poziom terenu) ich wskazania odbiegają od wskazań stacji Państwowego Monitoringu Środowiska, wierniej oddając zagrożenia związane z oddziaływaniem pyłów na ludzi długotrwale przebywających w granicach „hot-spotu”. Niniejszy projekt kładzie nacisk na indywidualne urządzenia grzewcze jako podstawowe źródła wysokich poziomów stężeń w „hot-spotach” o charakterze miejskim, w związku z czym dane pomiarowe z urządzeń stacjonarnych prezentowane w niniejszym raporcie dotyczą okresu grzewczego (listopad 2025 – marzec 2026).

Wypracowane wytyczne do określania „hot-spotów” oraz monitorowania efektów wdrażania uchwały antysmogowej będą mogły być wykorzystywane przez gminy i województwa na terenie całego kraju oraz w innych krajach. Zadanie stanowi bezpośrednią realizację zapisów POP [realizacja zadania POP – sekcja 1.8.2, str. 181, sekcja 1.8.4, od str. 185]

2 Metodyka pomiarów

2.1 Pomiary z wykorzystaniem dronów

Pomiary względnych wartości stężeń PM10 (w odniesieniu do CO₂) zrealizowano za pomocą profesjonalnych dronów przemysłowych, które wyposażone zostały w układy pomiarowe zawierające czujniki stężeń w/w substancji. Loty odbywały się w minionym sezonie grzewczym, (02.12.2025-06.02.2026) oznaczonym S4 w godzinach porannych (7:00-10:00) lub późnopołudniowych/wieczornych (15:00-19:00). Na terenie każdego z wytypowanych „hot-spotów” pomiar przeprowadzany był 3-krotnie (w różnych dniach lub o różnych porach). Pomiar obejmował przelot dronem nad wszystkimi budynkami znajdującymi się w danym „hot-spocie” (30-50 budynków) oraz określenie oraz zachowanie w pamięci miernika drona stężeń PM10 i CO₂ w smudze spalin nad ich kominami (Rys.1). Każdy pomiar nad emitorem trwał ok. 60 s, a przelot pomiarowy nad całym „hot-spotem” ok. 1h. W trakcie pomiaru na bieżąco prowadzono obserwację (realizowaną przez dodatkowego operatora) dynamiki zmian wartości stężeń nad poszczególnymi emitorami.



Rys. 1. Pomiar stężeń PM10 i CO₂ nad emitorem w jednym z hot-spotów (styczeń 2026).

W ramach każdego pomiaru dron wykonywał loty w standardzie obejmującym:

- ❖ dokonanie obserwacji kierunku i prędkości wiatru oraz temperatury powietrza,
- ❖ dołot do strumienia gazów odlotowych po zawietrznej stronie komina budynku,
- ❖ wykonanie zawisu w odległości 1 - 2 m od komina o czasie ok. 60 s, możliwie jak najbliżej osi strumienia gazów odlotowych,
- ❖ pomiar stężeń PM10 i CO₂ (oraz ewentualnie zanieczyszczeń charakterystycznych dla współspalania odpadów),
- ❖ dokonanie odczytu współrzędnych i godziny pomiaru i przypisanie im wartości zmierzonych stężeń.

2.2 Pomiary stacjonarne

W celu wsparcia pomiarów dronowych prowadzonych na terenie wytypowanych „hot-spotów” oraz oceny zmian jakości powietrza w następstwie wdrażania zapisów śląskiej uchwały „antysmogowej” (Uchwała Nr V/36/1/2017 Sejmiku Województwa Śląskiego z dnia 7 kwietnia 2017 r.), w okresie jej wprowadzania w życie – (tj. do końca roku 2027), na terenie wytypowanych obszarów zainstalowano czujniki pyłu zawieszonego (Rys. 2). Rozmieszczone na terenie gminy zestawy pomiarowe składają się z miernika stężeń PM1, PM2,5 i PM10 oraz temperatury i wilgotności, a także modułu GSM zapewniającego przesyłanie danych pomiarowych w czasie rzeczywistym.



Rys. 2. Widok ogólny czujnika pyłu zawieszonego z modułem GSM (po lewej).

Czujniki zamontowano na obrzeżach każdego „hot-spotu” w 3 różnych punktach pomiarowych leżących po zawiętrznej stronie obszaru, względem kierunku dominujących wiatrów. Miejsca ich zamontowania zaznaczono na mapach obrazujących trasy przelotów dronem nad „hot-spotem” (Rys. 4-16). Na Rys. 3 i 4 przedstawiono przykładowe fotografie miejsc zamontowania czujnika w widoku na zewnątrz budynku oraz od środka. Jeden z czujników, zlokalizowanych w Miedźnie, został uszkodzony w lipcu 2024 i nie dysponujemy zapisami jego rejestracji w S3 (por. rys. 7).



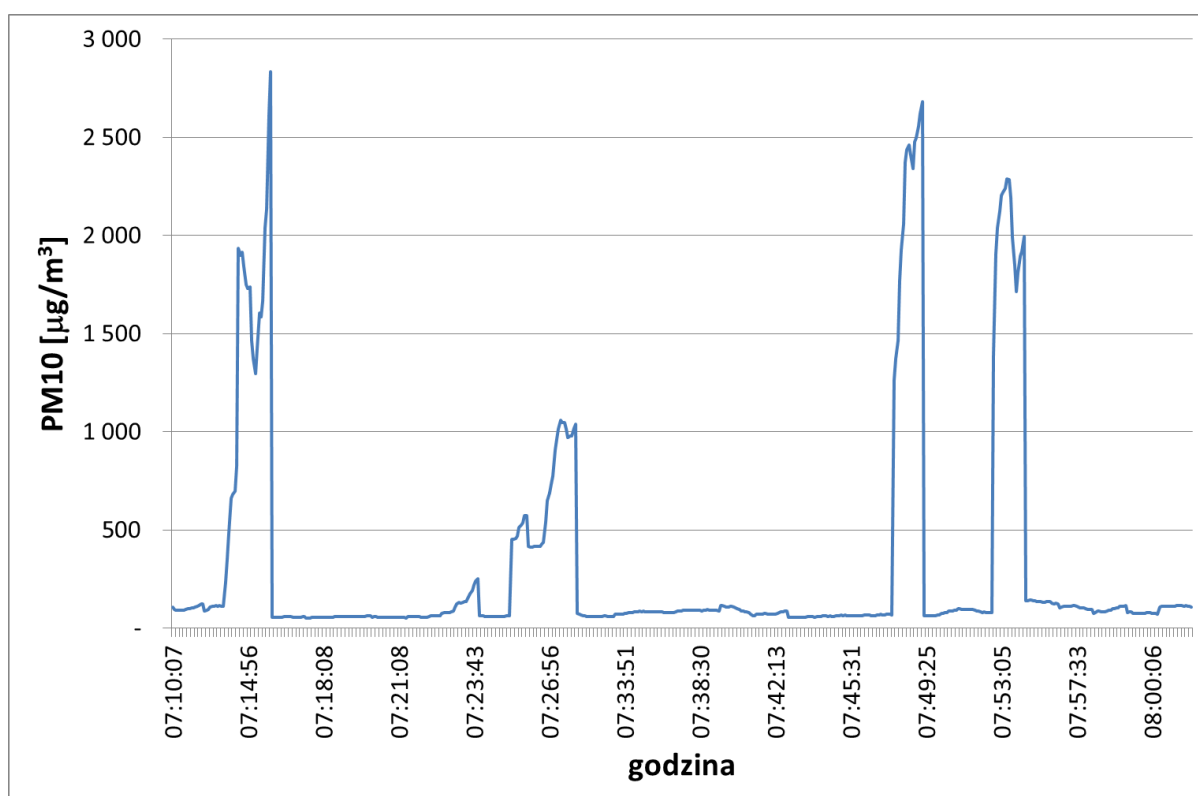
Rys. 3. Zainstalowany czujnik pyłu zawieszonego - widok od środka pomieszczenia.



Rys. 4. Zainstalowany czujnik pyłu zawieszonego - widok na zewnątrz budynku.

3 Wyniki kampanii pomiarowej

W Tab. 1-30 przedstawiono średnie wartości stężeń nad emitorami, z których emisja w trakcie pomiaru przekraczała wartości stężeń tła – w praktyce obrazowały to chwilowe wzrosty (piki) na wykresach przebiegu stężeń (Rys. 5), a w realiach pomiarowych mniej lub bardziej widoczna emisja nad emitorem (widoczne gazy odlotowe – Rys. 6). Przedstawione w tabelach wartości tła to średnie wartości rejestrowane przez czujniki zamontowane na dronie w trakcie przelotu pomiędzy emitorami lub nad niedymiącymi emitorami. Tabele zawierają również wyliczone wartości wskaźnika PDW (stosunek $\text{CO}_2/\text{PM}_{10}$). Sumarycznie w obecnym sezonie zestawiono 148 wartości w Tab. 1-30 (w ubiegłych latach było ich kolejno 207, 229 i 172). Na mapach (Rys. 7-16) przedstawiono natomiast trasy poszczególnych przelotów nad każdym z „hot-spotów” wraz z naniesionymi lokalizacjami montażu czujników stacjonarnych.



Rys. 5. Przykładowy przebieg zmian stężeń PM_{10} w trakcie jednego przelotu pomiarowego nad hot-spotem. Widoczne piki odpowiadają wzrostom stężeń nad emitorami.



Rys. 6. Dron podczas pomiaru nad dymiącym emitorem.

Tabela 1. Miedźno, 03.12.2025

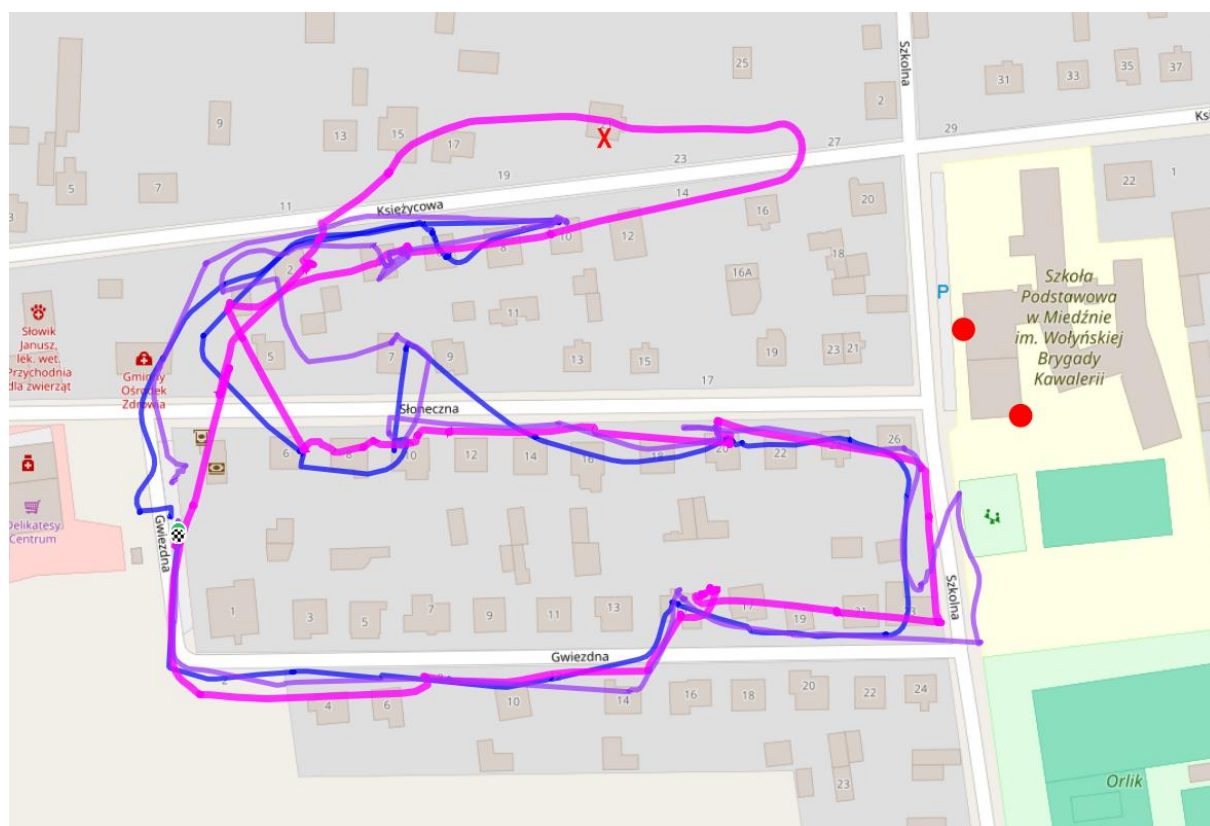
Lp.	Nr pomiaru	Tło		
		122.9	579.2	4.7
		PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	CO2 [ppm]	PDW
1	M11	1203.3	579.3	0.5
2	M21	936.1	579.2	0.6
3	M31	684.3	579.2	0.8
4	M41	1517.1	586.5	0.4
5	M51	233.6	579.3	2.5
6	M61	303.4	579.4	1.9
7	M71	319.7	579.3	1.8
	Średnia	742.5	580.3	1.2

Tabela 2. Miedźno, 10.12.2025

Lp.	Nr pomiaru	Tło		
		29.7	578.3	19.5
		PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	CO2 [ppm]	PDW
1	M21	156.1	578.6	3.7
2	M22	186.5	580.4	3.1
3	M23	1124.5	580.7	0.5
4	M24	217.3	578.5	2.7
5	M25	161.6	578.2	3.6
6	M26	60.6	578.1	9.5
	Średnia	317.8	579.1	3.9

Tabela 3. Miedźno, 17.12.2025

Lp.	Nr pomiaru	Tło		
		44.6 PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	578.9 CO2 [ppm]	13.0 PDW
1	M1	70.8	578.9	8.2
2	M2	66.9	578.9	8.7
3	M3	66.9	579.0	8.7
4	M4	618.2	578.9	0.9
5	M5	68.9	579.6	8.4
6	M6	160.5	578.9	3.6
7	M7	94.7	579.0	6.1
	Średnia	163.9	579.0	6.4



Rys. 7. Trasy przelotów dronem nad hot-spotem w Miedźnie.
Czerwone punkty określają lokalizację czujników stacjonarnych. Czerwony znak X
oznacza nieaktywny w S4 czujnik, który uległ uszkodzeniu.

Tabela 4. Koszęcin, 02.12.2025

Lp.	Nr pomiaru	Tło		
		402.9 PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	579.6 CO2 [ppm]	1.4 PDW
1	K21	1006.2	579.8	0.6
2	K22	1094.8	579.8	0.5
3	K23	954.8	579.6	0.6
4	K24	1440.1	579.6	0.4
	Średnia	1124.0	579.7	0.5

Tabela 5. Koszęcin, 10.12.2025

Lp.	Nr pomiaru	Tło		
		20.8 PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	577.8 CO2 [ppm]	28.4 PDW
1	K11	158.9	578.1	3.6
2	K12	477.0	578.1	1.2
3	K13	176.7	577.9	3.3
	Średnia	270.9	578.1	2.7

Tabela 6. Koszęcin, 25.02.2026

Lp.	Nr pomiaru	Tło		
		25.1 PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	578.9 CO2 [ppm]	23.1 PDW
1	K31	713.6	579.0	0.8
	Średnia	713.6	579.0	0.8



Rys. 8. Trasy przelotów dronem nad hot-spotem w Koszęcinie w S4. Czerwone punkty określają lokalizację czujników stacjonarnych.

Tabela 7. Rybnik, 02.12.2025

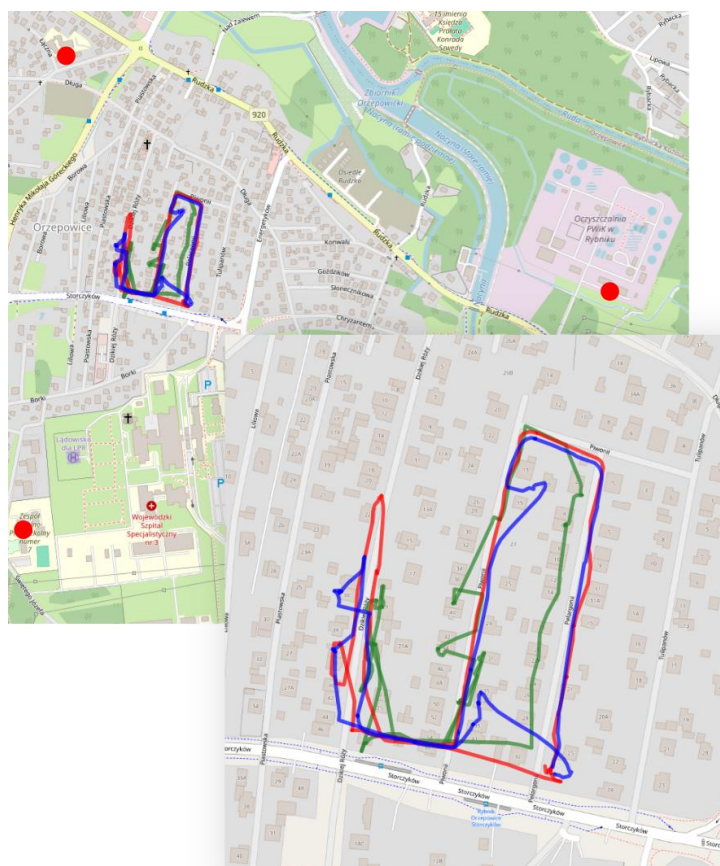
Lp.	Nr pomiaru	Tło		
		193.3 PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	579.4 CO2 [ppm]	3.0 PDW
1	R11	276.0	579.3	2.1
2	R12	335.5	579.3	1.7
3	R13	467.8	579.4	1.2
4	R14	542.8	579.4	1.1
	Średnia	405.5	579.4	1.5

Tabela 8. Rybnik, 04.02.2026

Lp.	Nr pomiaru	Tło		
		146.5 PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	579.8 CO2 [ppm]	4.0 PDW
1	R21	244.3	579.7	2.4
	Średnia	244.3	579.7	2.4

Tabela 9. Rybnik, 06.02.2026

Lp.	Nr pomiaru	Tło		
		75.3 PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	579.2 CO2 [ppm]	7.7 PDW
1	R31	412.4	579.1	1.4
2	R32	300.4	579.0	1.9
	Średnia	356.4	579.1	1.7



Rys. 9. Trasy przeleotów dronem nad hot-spotem w Rybniku w S4. Czerwone punkty określają lokalizację czujników stacjonarnych.

Tabela 10. Węgierska Górka, 15.12.2025

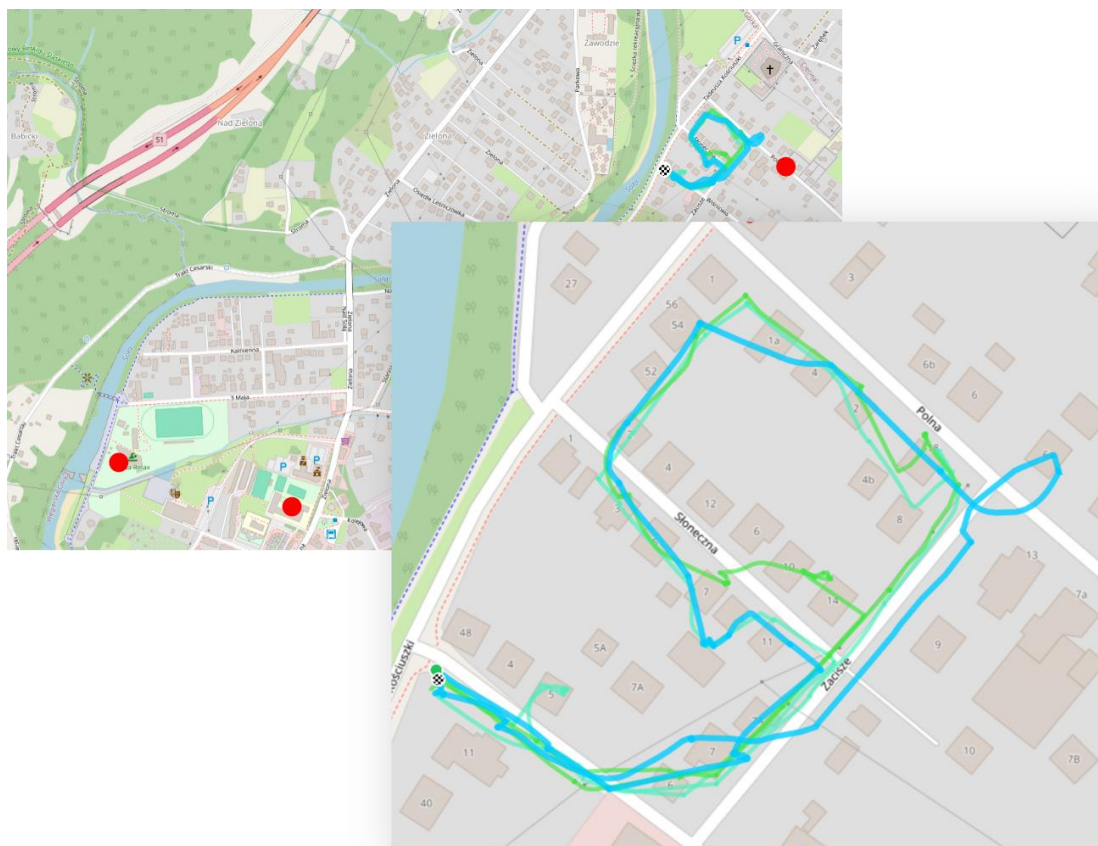
Lp.	Nr pomiaru	Tło		
		24.3 PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	579.3 CO2 [ppm]	23.8 PDW
1	WG11	76.7	579.2	7.6
2	WG12	283.3	579.1	2.0
	Średnia	180.0	579.2	4.8

Tabela 11. Węgierska Górka, 17.02.2026

Lp.	Nr pomiaru	Tło		
		53.2 PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	580.1 CO2 [ppm]	10.9 PDW
1	WG21	163.6	580.1	3.5
2	WG22	256.7	580.1	2.3
3	WG23	161.0	580.1	3.6
	Średnia	193.8	580.1	3.1

Tabela 12. Węgierska Górka, 24.02.2026

Lp.	Nr pomiaru	Tło		
		12.0 PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	578.8 CO2 [ppm]	48.2 PDW
1	WG31	279.9	578.8	2.1
2	WG32	30.9	578.7	18.7
	Średnia	155.4	578.7	10.4



Rys. 10. Trasy przelotów dronem nad hot-spotem w Węgierskiej Górze w S4. Czerwone punkty określają lokalizację czujników stacjonarnych.

Tabela 13. Żywiec, 05.02.2026

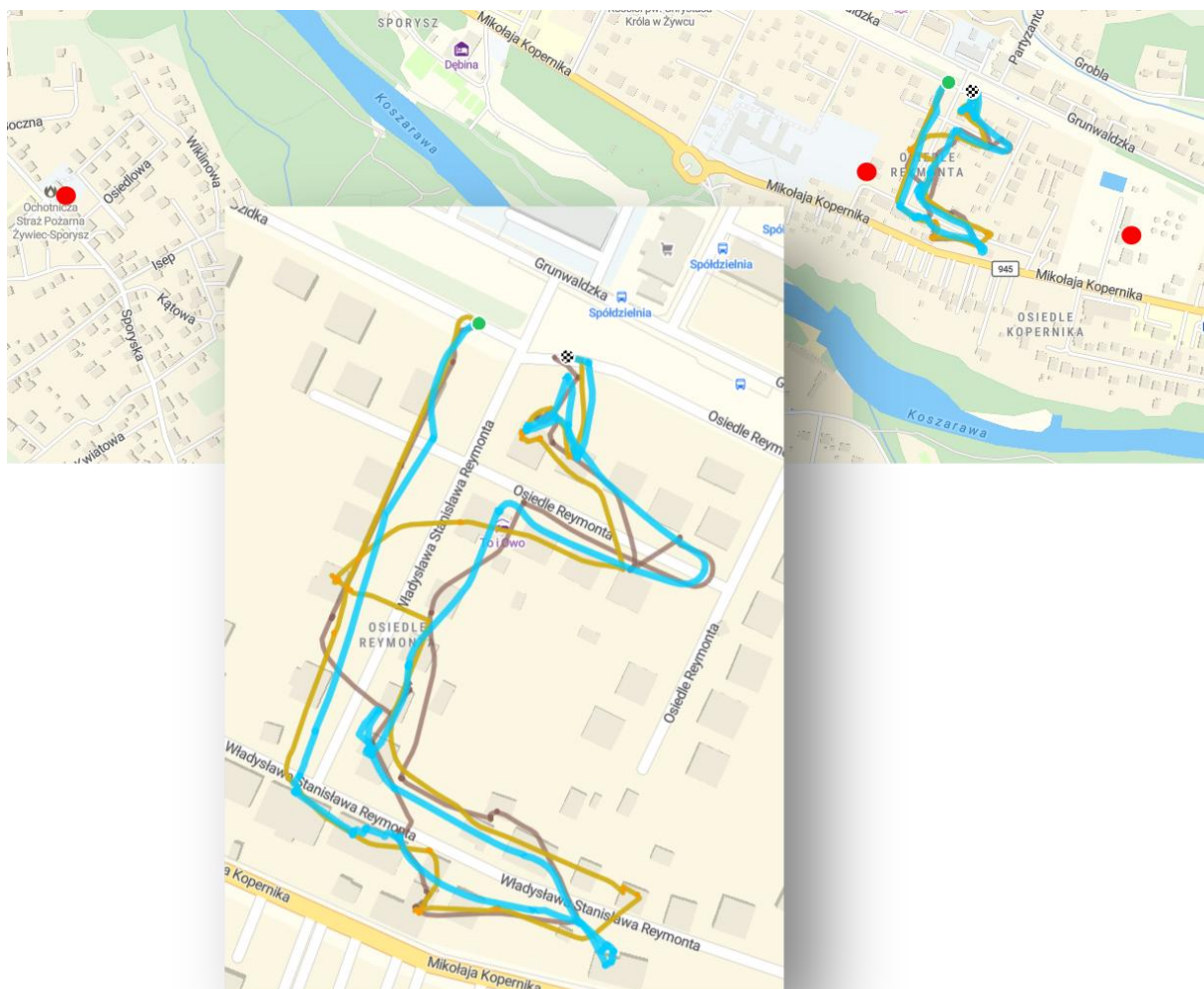
Lp.	Nr pomiaru	Tło		
		57.1	590.9	10.3
		PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	CO2 [ppm]	PDW
1	Z11	953.1	580.3	0.6
2	Z12	529.8	580.3	1.1
3	Z13	368.6	580.2	1.6
4	Z14	1136.8	580.2	0.5
5	Z15	352.5	600.9	1.7
	Średnia	668.2	584.4	1.1

Tabela 14. Żywiec, 19.02.2026

Lp.	Nr pomiaru	Tło		
		21.5	578.8	26.9
		PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	CO2 [ppm]	PDW
1	Z21	409.4	578.9	1.4
2	Z22	298.1	578.9	1.9
3	Z23	369.5	578.8	1.6
4	Z24	410.1	578.7	1.4
	Średnia	371.8	578.8	1.6

Tabela 15. Żywiec, 24.03.2026

Lp.	Nr pomiaru	Tło		
		43.3	579.0	13.4
		PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	CO2 [ppm]	PDW
1	Z31	647.3	582.9	0.9
2	Z32	1197.1	579.6	0.5
3	Z33	1144.8	579.3	0.5
4	Z34	1021.8	805.5	0.8
5	Z35	136.9	587.5	4.3
	Średnia	829.6	626.9	1.4



Rys. 11. Trasy przelotów dronem nad hot-spotem w Żywc w S4.
Czerwone punkty określają lokalizację czujników stacjonarnych.

Tabela 16. Częstochowa, 19.01.2026

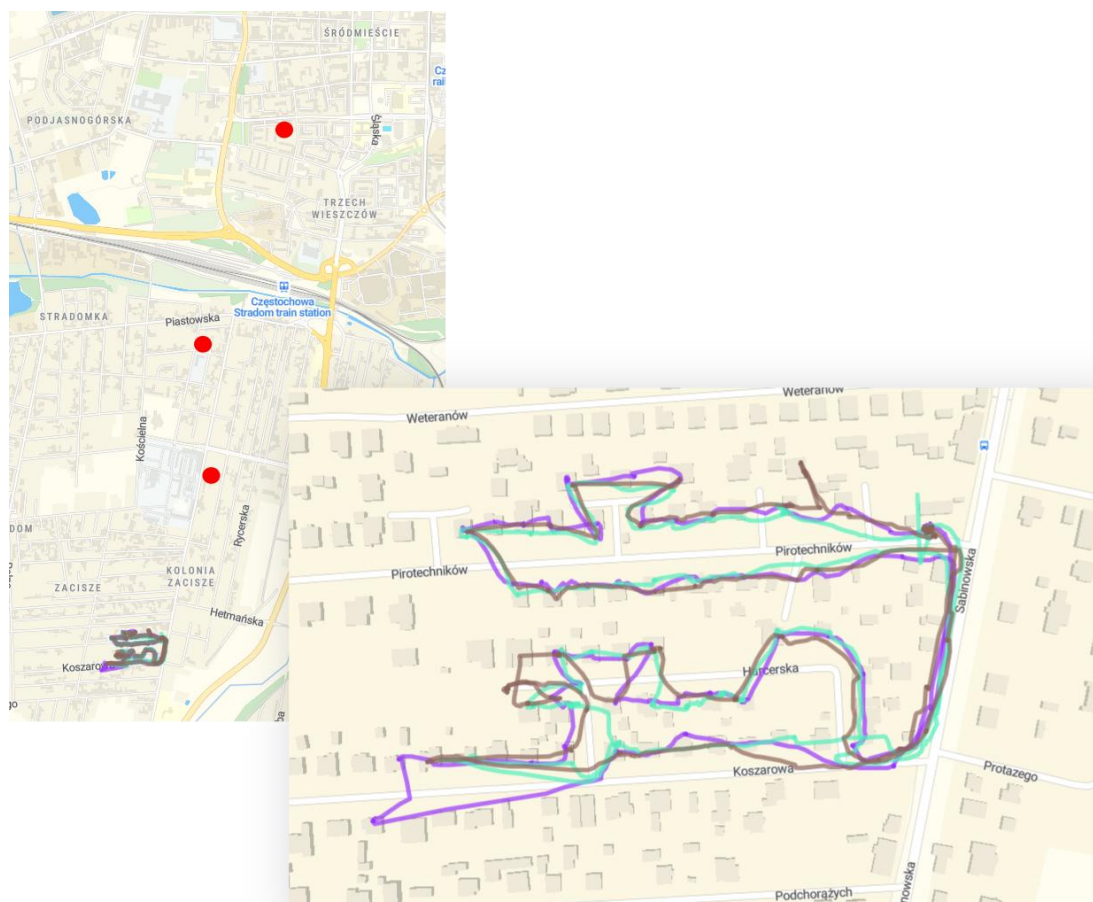
Lp.	Nr pomiaru	Tło		
		349.8 PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	602.8 CO2 [ppm]	1.7 PDW
1	C11	470.0	614.7	1.3
2	C12	479.3	614.2	1.3
3	C13	498.2	619.4	1.2
4	C14	613.6	732.4	1.2
5	C15	571.3	695.9	1.2
6	C16	693.7	670.1	1.0
7	C17	542.7	661.0	1.2
8	C18	2174.9	727.9	0.3
	Średnia	755.5	667.0	1.1

Tabela 17. Częstochowa, 20.01.2026

Lp.	Nr pomiaru	Tło		
		67.6 PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	577.2 CO2 [ppm]	8.5 PDW
1	C21	140.2	610.1	4.4
2	C22	103.7	586.3	5.7
3	C23	130.2	583.6	4.5
4	C24	131.8	581.6	4.4
5	C25	1338.9	1067.6	0.8
6	C26	436.6	595.6	1.4
7	C27	108.9	593.6	5.5
	Średnia	341.5	659.8	3.8

Tabela 18. Częstochowa, 21.01.2026

Lp.	Nr pomiaru	Tło		
		45.3 PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	560.6 CO2 [ppm]	12.4 PDW
1	C31	781.8	614.5	0.8
2	C32	82.2	581.4	7.1
3	C33	90.2	574.0	6.4
4	C34	85.9	569.4	6.6
5	C35	78.2	567.4	7.3
	Średnia	223.7	581.3	5.6



Rys. 12. Trasy przelotów dronem nad hot-spotem w Częstochowie w S4. Czerwone punkty określają lokalizację czujników stacjonarnych.

Tabela 19. Woźniki, 22.01.2026

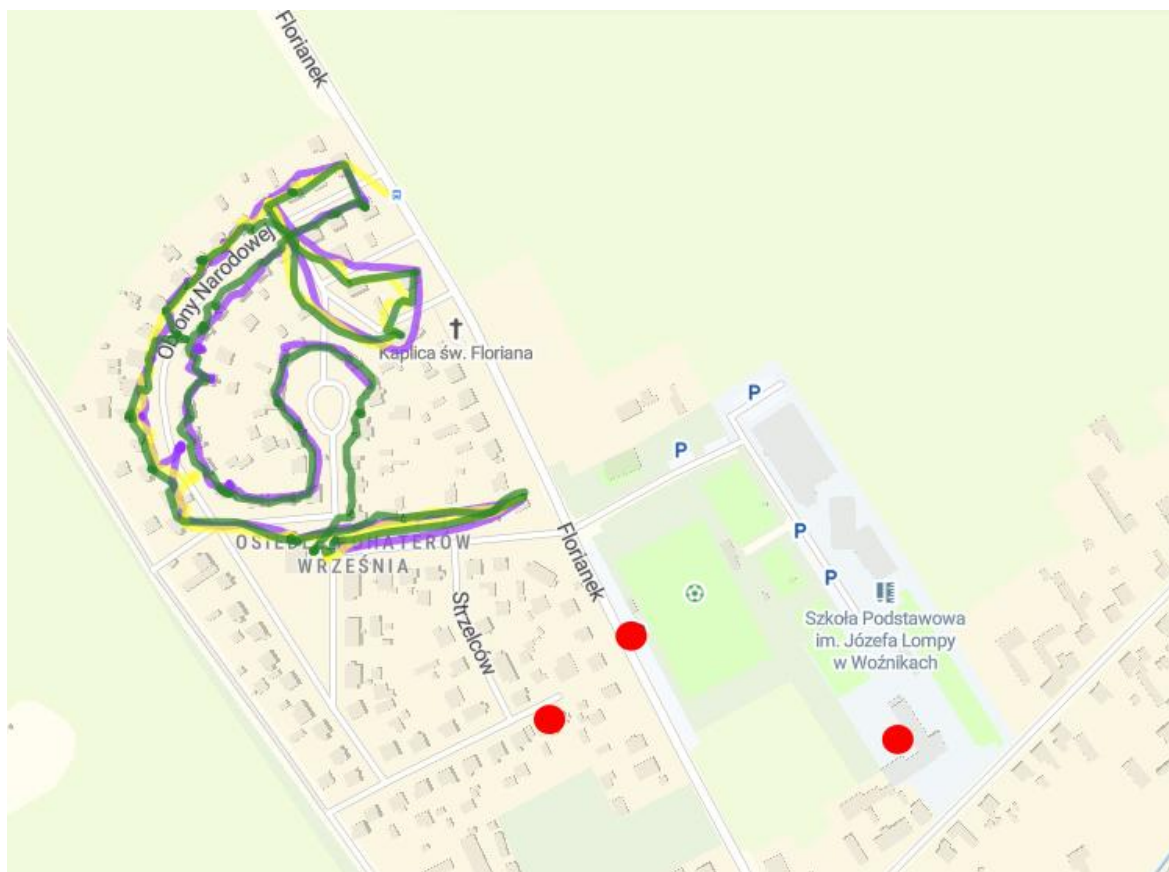
Lp.	Nr pomiaru	Tło		
		234.8	581.9	2.5
		PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	CO2 [ppm]	PDW
1	W11	1230.5	713.0	0.6
2	W12	412.0	650.2	1.6
3	W13	1201.0	617.5	0.5
4	W14	649.5	578.1	0.9
5	W15	461.4	588.1	1.3
6	W16	412.4	592.9	1.4
7	W17	1083.3	625.4	0.6
8	W18	454.7	581.3	1.3
	Średnia	738.1	618.3	1.0

Tabela 20. Woźniki, 23.01.2026

Lp.	Nr pomiaru	Tło		
		108.1	590.0	5.5
		PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	CO2 [ppm]	PDW
1	W21	893.4	930.2	1.0
2	W22	1604.8	592.3	0.4
3	W23	2355.7	650.2	0.3
4	W24	930.6	641.3	0.7
5	W25	242.1	598.1	2.5
6	W26	472.3	592.4	1.3
7	W27	914.6	662.2	0.7
8	W28	919.8	646.7	0.7
	Średnia	1041.7	664.2	0.9

Tabela 21. Woźniki, 27.01.2026

Lp.	Nr pomiaru	Tło		
		121.0	568.1	4.7
		PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	CO2 [ppm]	PDW
1	W31	204.1	580.8	2.8
2	W32	196.7	580.1	2.9
3	W33	1718.1	567.0	0.3
4	W34	259.7	567.0	2.2
5	W35	197.6	568.8	2.9
6	W36	651.5	573.0	0.9
7	W37	289.0	577.1	2.0
8	W38	223.9	575.5	2.6
9	W39	657.6	598.6	0.9
	Średnia	488.7	576.4	1.9



Rys. 13. Trasy przelotów dronem nad hot-spotem w Woźnikach w S4. Czerwone punkty określają lokalizację czujników stacjonarnych.

Tabela 22. Krzepice, 20.01.2026

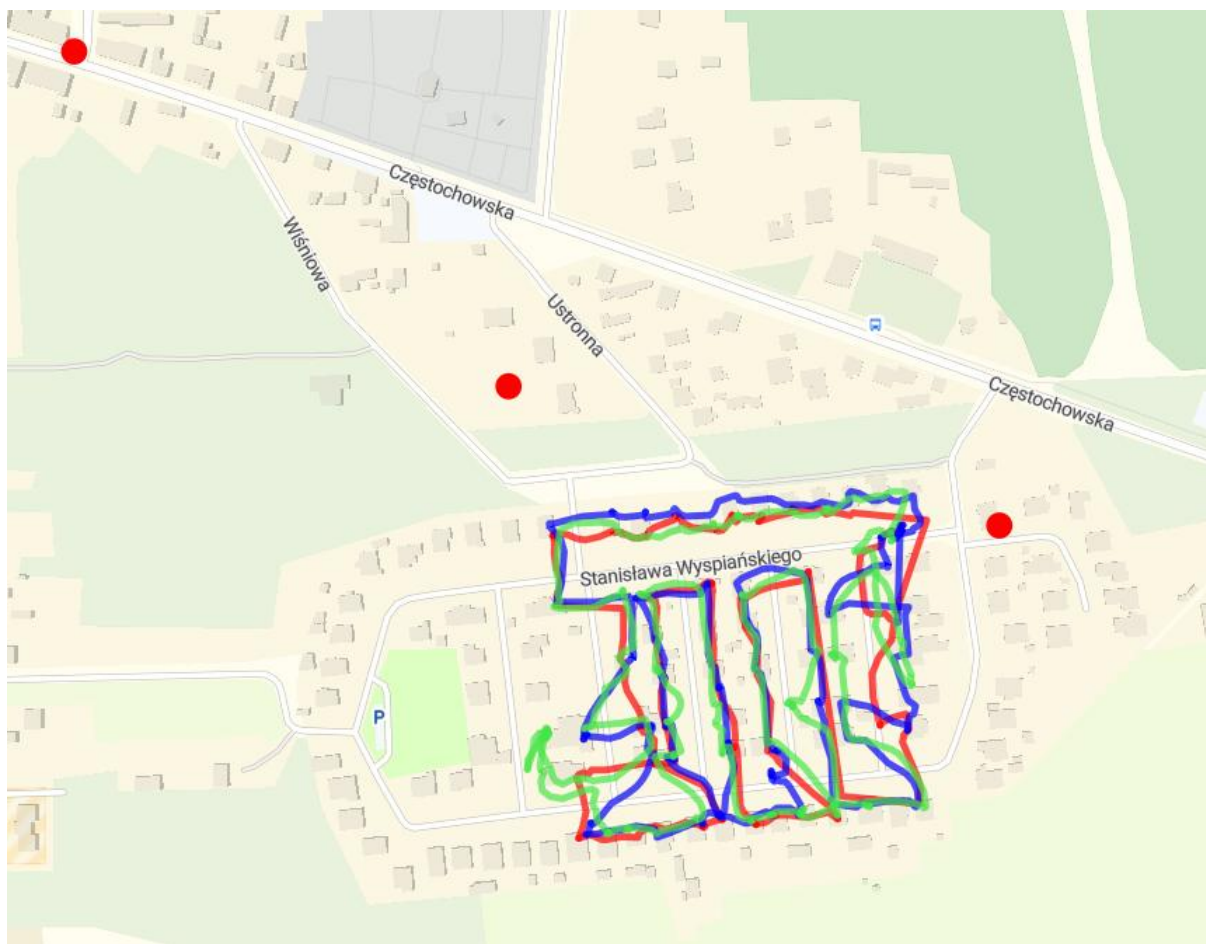
Lp.	Nr pomiaru	Tło		
		37.1	566.4	15.3
		PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	CO2 [ppm]	PDW
1	KR11	57.1	589.1	10.3
2	KR12	53.2	576.9	10.8
3	KR13	250.0	568.5	2.3
4	KR14	55.4	571.0	10.3
	Średnia	103.9	576.4	8.4

Tabela 23. Krzepice, 26.01.2026

Lp.	Nr pomiaru	Tło		
		13.5	560.5	41.6
		PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	CO2 [ppm]	PDW
1	KR21	64.3	615.4	9.6
2	KR22	28.5	577.8	20.3
3	KR23	29.5	562.8	19.1
	Średnia	40.8	585.3	16.3

Tabela 24. Krzepice, 26.01.2026

Lp.	Nr pomiaru	Tło		
		12.0	562.1	46.8
		PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	CO2 [ppm]	PDW
1	KR31	274.1	598.0	2.2
	Średnia	274.1	598.0	2.2



Rys. 14. Trasy przelotów dronem nad hot-spotem w Krzepicach w S4. Czerwone punkty określają lokalizację czujników stacjonarnych.

Tabela 25. Bojszowy, 22.01.2026

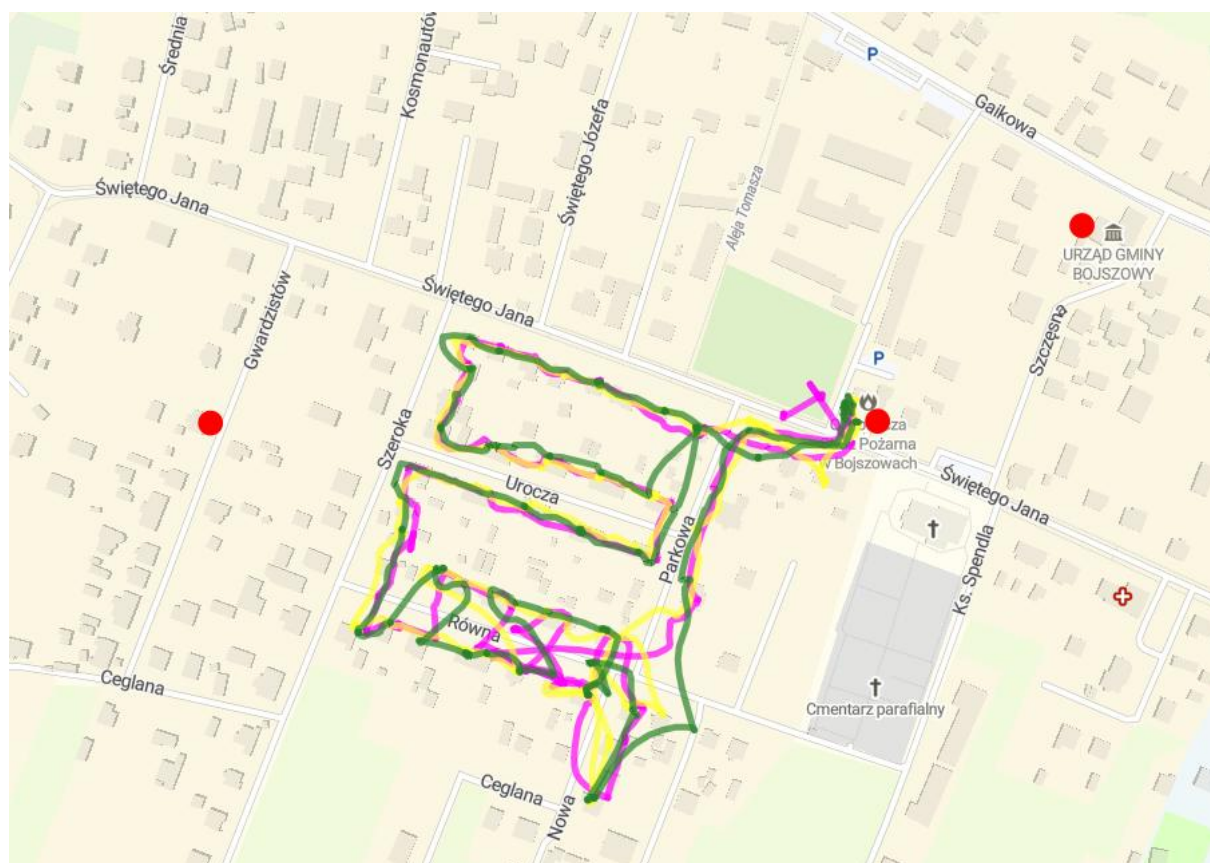
Lp.	Nr pomiaru	Tło		
		389.6 PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	593.9 CO2 [ppm]	1.5 PDW
1	B11	914.6	626.5	0.7
2	B12	619.7	599.7	1.0
3	B13	563.9	597.6	1.1
4	B14	751.5	593.8	0.8
5	B15	511.4	599.0	1.2
6	B16	524.5	602.3	1.1
	Średnia	647.6	603.2	1.0

Tabela 26. Bojszowy, 23.01.2026

Lp.	Nr pomiaru	Tło		
		546.9 PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	606.9 CO2 [ppm]	1.1 PDW
1	B21	888.5	666.3	0.8
2	B22	1990.6	762.3	0.4
3	B23	1040.6	647.4	0.6
4	B24	1122.6	642.0	0.6
5	B25	1849.7	683.2	0.4
6	B26	1193.2	611.9	0.5
	Średnia	1347.5	668.9	0.6

Tabela 27. Bojszowy, 25.01.2026

Lp.	Nr pomiaru	Tło		
		158.6 PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	579.1 CO2 [ppm]	3.7 PDW
1	B31	266.7	592.9	2.2
2	B32	270.0	582.2	2.2
3	B33	564.3	608.1	1.1
4	B34	311.5	716.5	2.3
5	B35	885.5	628.7	0.7
6	B36	466.3	685.0	1.5
	Średnia	460.7	635.6	1.7



Rys. 15. Trasy przelotów dronem nad „hot-spotem” w Bojszowach w S4.
Czerwone punkty określają lokalizację czujników stacjonarnych.

Tabela 28. Ogrodzieniec, 18.01.2026

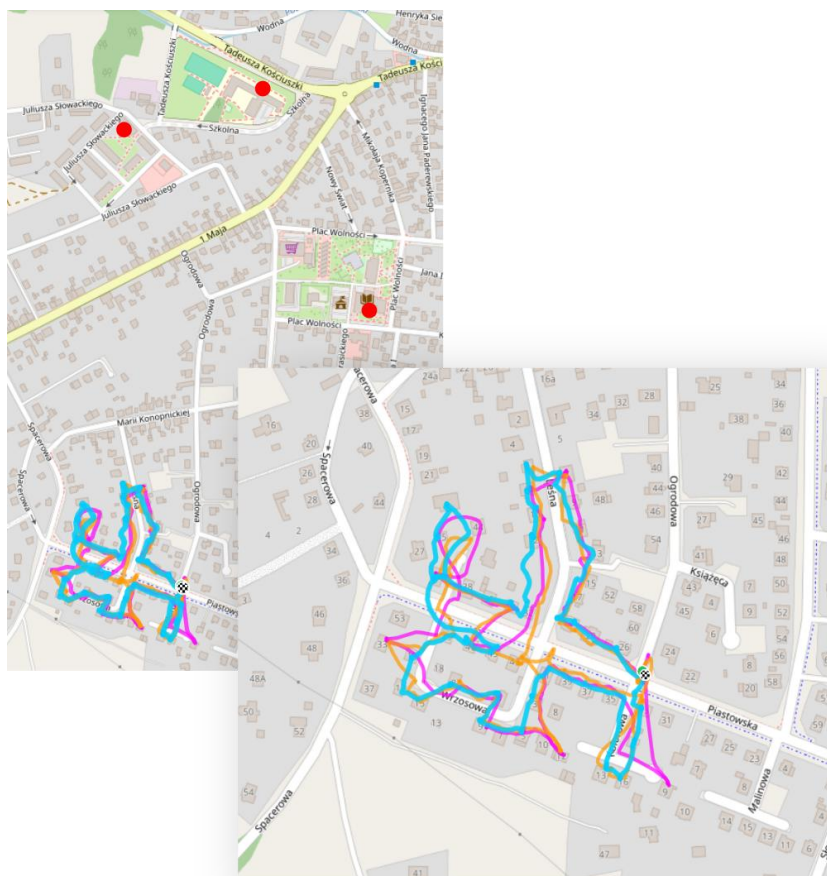
Lp.	Nr pomiaru	Tło		
		57.0 PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	594.5 CO2 [ppm]	10.4 PDW
1	O11	132.1	596.3	4.5
2	O12	124.2	595.5	4.8
3	O13	140.4	595.6	4.2
4	O14	185.0	595.1	3.2
5	O15	1819.7	865.8	0.5
6	O16	332.4	620.1	1.9
	Średnia	455.7	644.7	3.2

Tabela 29. Ogrodzieniec, 19.01.2026

Lp.	Nr pomiaru	Tło		
		83.0 PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	594.7 CO2 [ppm]	7.2 PDW
1	O21	163.5	1131.7	6.9
2	O22	785.6	993.4	1.3
3	O23	2599.3	681.2	0.3
4	O24	244.0	700.7	2.9
5	O25	196.6	654.3	3.3
6	O26	204.0	610.5	3.0
7	O27	185.3	597.1	3.2
	Średnia	625.5	767.0	3.0

Tabela 30. Ogrodzieniec, 21.01.2026

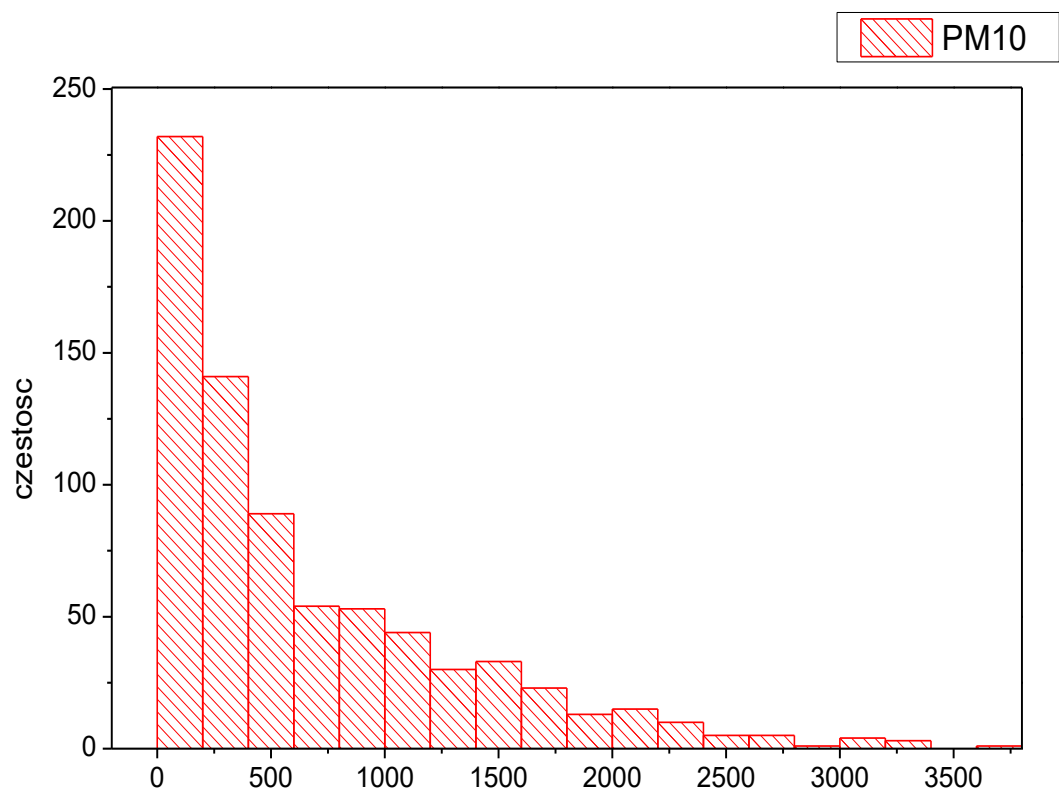
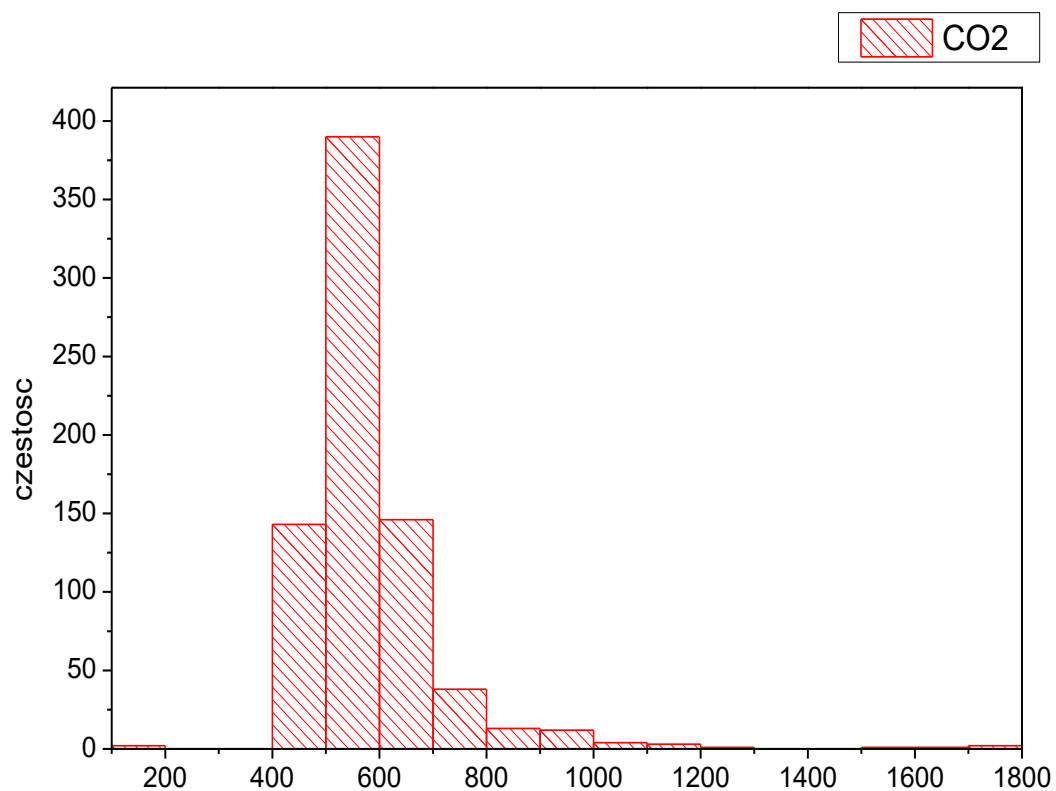
Lp.	Nr pomiaru	Tło		
		135.7 PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	560.4 CO2 [ppm]	4.1 PDW
1	O31	1520.3	638.1	0.4
2	O32	1558.8	611.8	0.4
3	O33	310.2	643.0	2.1
4	O34	258.9	574.9	2.2
5	O35	3152.2	838.7	0.3
	Średnia	1360.1	661.3	1.1



Rys. 16. Trasy przelotów dronem nad hot-spotem w Ogrodzieńcu w S4. Czerwone punkty określają lokalizację czujników stacjonarnych.

Na Rys. 17 porównano zestawienie częstości występowania uzyskanych wartości stężeń PM10 i CO₂ z emitorów w oparciu o dane przedstawione w Tab. 1-30 we wszystkich 4 dotychczasowych raportach (4 sezony grzewcze). Porównanie czterech sezonów pokazuje, że struktura emisji pyłu PM10 wyraźnie zmieniała się w czasie, co potwierdzają konkretne udziały procentowe w poszczególnych przedziałach. W S1 emisja utrzymywała się na stałym, wysokim poziomie: aż 35,4% wszystkich pomiarów stanowiły stężenia powyżej 600 µg/m³, podczas gdy wyniki najniższe (0-150 µg/m³) stanowiły zaledwie 22,7%, co było najgorszym wynikiem w całym badaniu. S2 przyniósł skrajną zmienność, ponieważ z jednej strony odnotowano tam najwyższy, bo aż 35,7% udział najniższych odczytów (0-150 µg/m³), ale z drugiej strony aż 7,7% prób przekroczyło wartość 2000 µg/m³. Ta kumulacja najwyższych wartości wygenerowała najwyższą średnią ogólną w tym sezonie (726,9 µg/m³). S3 stanowił wyraźny etap przejściowy i początek stabilizacji mierzonych wartości. Udział najniższych emisji (0-150 µg/m³) wzrósł do 30,2%, a najwyższe wartości stężeń zostały już znacząco ograniczone do poziomu 2,9%, co przełożyło się na spadek średniej do 660,1 µg/m³. Dodatkowo to w S3 największa część danych (aż 32,0%) skumulowała się w przedziale umiarkowanym (150-300 µg/m³). Ostateczna stabilizacja profilu stężeń nastąpiła w S4. Wyniki najwyższe zostały tam niemal całkowicie wyeliminowane, spadając do zaledwie 0,7% udziału. Równocześnie duża część danych, bo aż 31,1%, utrzymała się w umiarkowanym przedziale 150-300 µg/m³, co obniżyło średnią do najniższego poziomu (632,1 µg/m³) i udowodniło faktyczne ograniczenie najwyższych skoków stężeń pyłu.

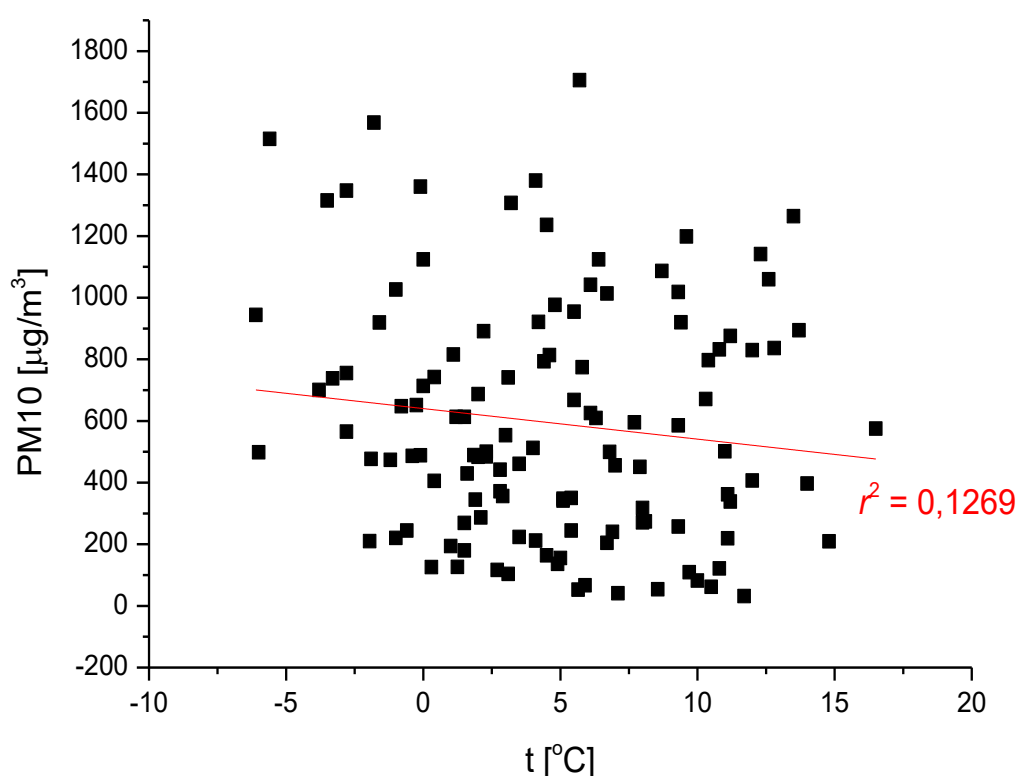
Analizując otrzymane dane można stwierdzić, że wartości stężeń emitowanych zanieczyszczeń (częstości występowania różnych poziomów stężeń PM10 i CO₂) zmieniały się okresowo w trakcie pomiarów, odzwierciedlając powszechną praktykę użytkowania indywidualnych urządzeń grzewczych, w której najważniejszym elementem decydującym o intensywności i jakości prowadzenia spalania, jest temperatura powietrza.



Rys. 17. Częstość występowania stężeń PM10 i CO2 (w %) we wszystkich 4 sezonach grzewczych.

Relacja taka jest dobrze widoczna na zależności średniego stężenia PM10 nad wylotami kominów w odniesieniu od temperatury powietrza w analizowanych czterech sezonach (Rys. 18). Dla całego tego zestawu danych ($n = 120$) trend jest nieco rozmyty, choć widoczna jest relacja spadkowa z temperaturą, której współczynnik korelacji wzrósł od oststniego porównania dla 3 sezonów z 0,0123 do 0,1269 dla 4 sezonów. Analiza wykresu pozwala potwierdzić poprzednie wywody:

- w okresach niskich temperatur ($< -5^{\circ}\text{C}$) zapotrzebowanie na ogrzewanie rośnie, a tym samym wzrasta emisja zanieczyszczeń z kotłów i pieców domowych,
- w okresach przejściowych ($> 10^{\circ}\text{C}$), gdy nie ma już mrozu, ale nadal bywa zimno, ogrzewanie stosowane jest doraźne rano i wieczorem, zatem za każdym razem realizowany jest rozpał, co zwiększa emisję (chłodny komin, rozruch paleniska),
- niskie emisje:
 - w okresach naszej typowej zimy (od -5 do 5°C) ogrzewanie jest realizowane w sposób ciągły, palenisko i komin się nie wychładza, co nawet przy zmniejszonej mocy nie generuje wysokiej emisji.



Rys. 18. Zależność zmian wartości średnich stężeń PM10 nad kominami od średniej temperatury w danym dniu pomiarowym dla 3 analizowanych sezonów (a). Wartości uśrednione (b) Współczynniki korelacji

W Tab. 31 zestawiono średnie wartości stężeń PM₁₀ mierzone za pomocą czujników stacjonarnych w czterech sezonach grzewczych (październik–marzec). Pierwszy sezon obejmuje okres od 11.12.2022 r., tj. od momentu uruchomienia sieci czujników. Średnie wartości w poszczególnych lokalizacjach mieściły się w zakresie od 5.9 do 118.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Średnia dla wszystkich punktów pomiarowych wyniosła odpowiednio 59.3, 51.2, 62.3 i 60.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ w sezonach S1–S4. Po wyraźnym spadku w S2 nastąpiło pogorszenie jakości powietrza w S3, kiedy wzrost średnich stężeń odnotowano w większości lokalizacji. W sezonie S4 średnia wartość PM₁₀ nieznacznie obniżyła się względem S3, jednak pozostała wyższa niż w S1 i S2. W porównaniu z S3 spadek średnich stężeń odnotowano w 17 z 26 lokalizacji, natomiast wzrost wystąpił w 9 punktach pomiarowych (pominięto lokalizacje z brakami danych). Świadczy to o częściowej poprawie jakości powietrza w skali całego obszaru badań, jednak utrzymujące się wzrosty w części lokalizacji wskazują na istotny wpływ lokalnych uwarunkowań emisyjnych oraz przebiegu sezonu grzewczego na kształtowanie stężeń PM₁₀.

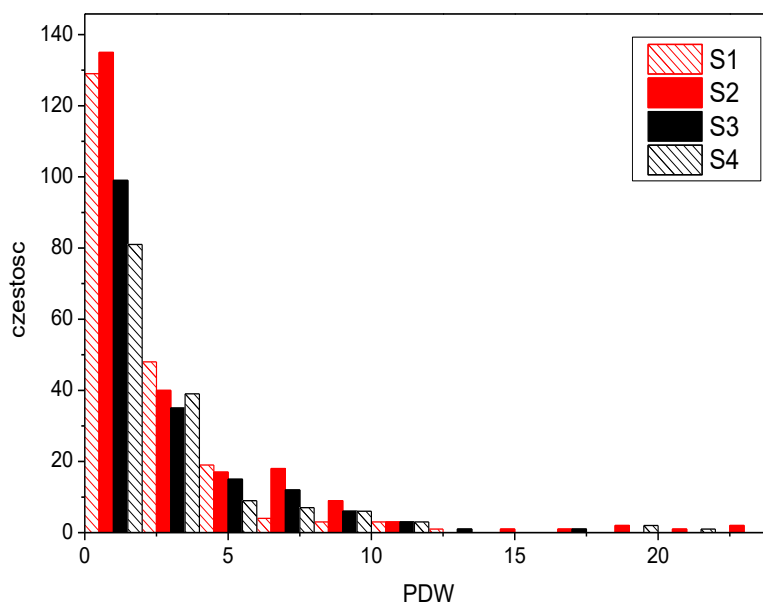
Tabela 31. Zestawienie średnich wartości stężeń PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] zmierzonych w poszczególnych „hot-spotach” za pomocą czujników stacjonarnych w 4 sezonach grzewczych (średnia za okres od października do marca). Na zielono zaznaczono spadek, a na czerwono wzrost wartości w stosunku do poprzedniego sezonu.

Częstochowa	S1	S2	S3	S4	Ogrodzieniec	S1	S2	S3	S4
ul. Sobieskiego 15	49.6	39.5	36.2	91.5	ul. Plac Wolności 25	46.5	51.0	62.0	40.0
ul. Powstańców 9	62.0	56.8	79.3	68.3	ul. Kościuszki 67	50.9	44.6	38.9	43.5
ul. Sabinowska 81	63.6	63.5	74.9	71.5	ul. Kościuszki 69	58.5	48.5	55.0	42.3
Żywiec					Koszęcin				
ul. Reymonta 10	77.3	69.5	101.6	118.9	ul. Szkolna 13	61.4	46.4	55.4	48.4
ul. Kopernika 83a	62.2	54.5	66.2	70.5	ul. Szkolna 4	60.2	13.1	17.2	11.8
ul. Sporyska 39	67.4	65.8	63.3	bd*)	ul. Sobieskiego 11a	57.0	57.7	58.7	58.1
Rybnik					Bojszowy				
ul. Borki 37 D	45.0	48.1	59.7	55.2	ul. Św. Jana 46	71.9	62.2	78.9	79.7
ul. Łączna 12 A	56.7	73.9	93.5	86.2	ul. Św. Jana 49	67.9	56.2	73.8	68.7
ul. Rudzka 132	36.4	41.2	45.0	56.8	ul. Gwardzistów 8	70.5	54.0	74.4	68.3
Krzepice					Miedźno				
ul. Częstochowska 13	66.8	52.3	51.9	5.9	ul. Szkolna 1	55.7	64.8	57.9	54.4
ul. Ustronna 10	58.2	50.4	63.9	45.6	ul. Szkolna 1	51.2	50.6	70.1	53.6
ul. Kozińskiego 1	61.6	55.6	72.3	74.6	ul. Księżycowa 21	51.3	40.6	bd**)	bd**)
Woźniki					Węgierska Górka				
ul. Kawalerii 3	65.2	56.6	69.1	64.7	ul. 3-go Maja 5	46.2	30.9	39.0	13.5
ul. Florianek 4	55.1	34.2	45.0	bd*)	ul. Zielona 42	62.9	51.2	64.1	72.8
ul. Powstańców 7	61.5	38.6	60.2	bd*)	ul. Polna 10 A	77.1	63.8	79.7	103.8

*) awaria czujnika

***) zawalenie się budynku, w którym był zlokalizowany czujnik. Nieaktywny od lipca 2024. Dotychczas brak nowej lokalizacji.

Wskaźnik PDW, definiowany jako stosunek stężenia CO₂ do PM₁₀, przyjmuje wysokie wartości dla pomiarów tła, natomiast maleje podczas rejestracji emisji z aktywnych emitorów, gdy wzrostowi stężenia pyłu nie towarzyszy proporcjonalny wzrost CO₂. W konsekwencji zmniejszanie udziału najniższych wartości PDW świadczy o ograniczeniu epizodów intensywnej emisji pyłowej i poprawie jakości spalania. Histogram przedstawiony na Rys. 19 wskazuje na wyraźną zmianę rozkładu wskaźnika w kolejnych sezonach grzewczych. Najbardziej niekorzystna klasa (PDW < 1) systematycznie zmniejsza swój udział – z 46.3% w S1, przez 44.5% w S2 i 40.1% w S3, do 33.1% w S4. Jednocześnie rośnie udział wartości pośrednich, zwłaszcza w przedziałach 1.0-2.0 oraz 2.0-3.0, które w S4 stanowią łącznie blisko 40% wszystkich pomiarów. Oznacza to, że w ostatnim sezonie rzadziej obserwowano przypadki bardzo wysokiej emisji pyłu względem CO₂, a częściej rejestrowano emisje o umiarkowanym charakterze. Pomimo że średnia wartość PDW była najwyższa w sezonie S2, wynikało to z większego udziału wartości skrajnie wysokich, które zawyżały średnią arytmetyczną. W sezonie S4 rozkład wskaźnika jest bardziej jednorodny i skoncentrowany wokół wartości pośrednich, co lepiej odzwierciedla rzeczywistą poprawę jakości spalania niż sama wartość średnia. Histogram potwierdza zatem korzystny trend zachodzący pomiędzy sezonami, polegający na stopniowym ograniczaniu liczby pomiarów o bardzo niskich wartościach PDW i przesuwaniu rozkładu w kierunku wartości charakterystycznych dla bardziej efektywnego spalania.



Rys. 19. Częstość uzyskanych wartości wskaźnika PDW w 4 sezonach pomiarowych dla pomiarów stężeń nad emitorem.

Statystyczne porównanie mierzonych wartości w trzech sezonach (Tab. 32) pokazuje wyraźny spadek liczby zarejestrowanych aktywnych emitorów (N) od S1 do S4: z 229 w S2 (maksimum) do 148 w S4, co sugeruje zmniejszającą się częstość epizodów emisji w czasie w badanych „hot-spotach”. Mimo spadku N, średnie stężenia PM10 nie zmniejszają się liniowo wraz z liczbą zdarzeń: S2 charakteryzuje się jednocześnie największą liczbą aktywnych emitorów oraz najwyższymi wartościami PM10, co wskazuje, że sezon ten był okresem wzmożonej aktywności emisyjnej. Wysokie maksimum PM10 w S2 dodatkowo sugeruje obecność silnych zdarzeń ekstremalnych. W S4 stężenie PM10 osiąga najniższą średnią (584.3), co przy najniższym N oznacza znaczącą poprawę procesu spalania oraz zmniejszenie aktywnych emitorów np. na skutek wymiany źródeł ogrzewania. Stężenia CO2 pozostają relatywnie stabilne pomiędzy sezonami, co wynika z ich obecności nawet przy prawidłowym spalaniu oraz generalnie wysokim stężeniu w tle.

Wskaźnik PDW (CO2/PM10) osiąga maksimum w S2 (3.0), co wskazuje na sezon o relatywnie większym udziale emisji gazowych względem pyłu, natomiast w S1 (2.1) dominuje komponent pyłowy. W sezonach S3 i S4 PDW stabilizuje się (2.6), co może sugerować bardziej jednorodny charakter emisji. Całościowo dane wskazują na spadek liczby zdarzeń (N) w czasie oraz zmianę ich charakteru: od bardziej pyłowego i zmiennego (S1-S2) do bardziej stabilnego i mniej intensywnego (S3-S4), przy jednoczesnym rozdzieleniu dynamiki PM10 i CO2.

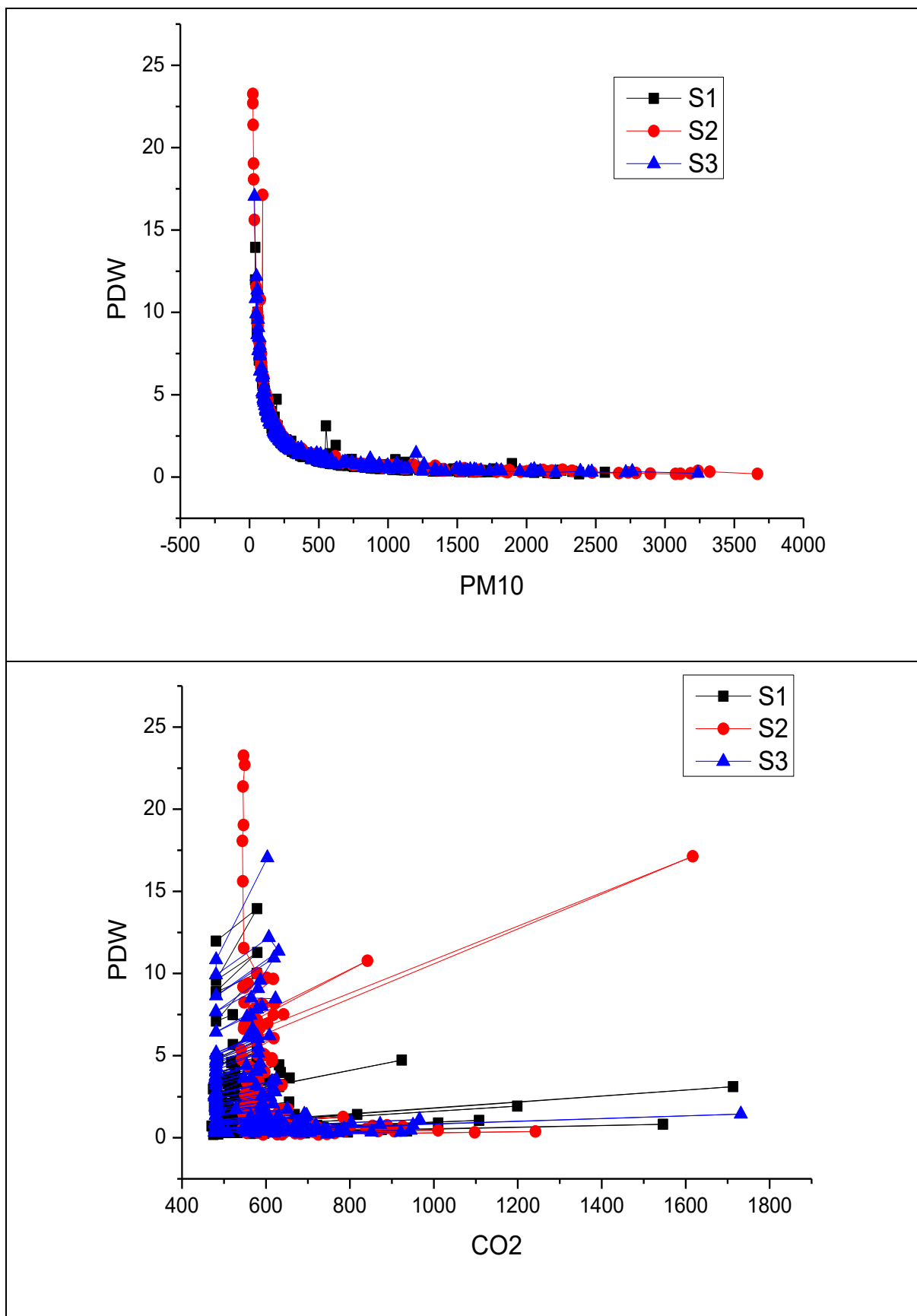
Tabela 32. Porównanie statystyczne pomiarów wykonanych w S1-S4.

Zanieczyszczenie	Sezon	S1	S2	S3	S4
	N	207	229	172	148
PM10	Średnia	671.2	726.9	660.7	584.3
	% pon. średniej	65	62	63	65
	Min	40.2	3.5	35.4	28.5
	Max	2 566.3	3 667.4	3 237.0	3 152.2
CO2	Średnia	573.2	619.0	586.2	618.4
	% pon. średniej	60	74	56	76
	Min	470.8	540.8	179.3	562.1
	Max	1 713.2	1 616.9	1 731.4	1 131.7
PDW	Średnia	2.1	3.0	2.6	2.6
	% pon. średniej	63	71	65	70
	Min	0.2	0.2	0.2	0.3
	Max	14.0	23.3	17.0	20.3

Zależność między PDW a PM10 ma charakter silnie nieliniowy i zgodnie z rozkładem danych najlepiej opisywana jest funkcją logarytmiczną (Rys. 20 - spadek PDW wraz ze wzrostem PM10 jest szybki przy niskich stężeniach, a następnie ulega spłaszczeniu przy wysokich wartościach PM10). Wynika to z faktu, że wzrost stężenia pyłu nie powoduje proporcjonalnego spadku PDW, lecz coraz mniejsze zmiany wskaźnika przy wysokich obciążeniach emisją. W danych obserwuje się wyraźną strukturę: wysokie wartości PDW (5-20) występują głównie przy bardzo niskich stężeniach PM10 ($<100 \mu\text{g}/\text{m}^3$), natomiast wraz ze wzrostem PM10 dominują wartości PDW w zakresie 0,2-2,5. Oznacza to, że przy pogarszających się warunkach emisyjnych (wysokie PM10) wskaźnik PDW systematycznie przechodzi w zakres niskich wartości, ale nie osiąga zerowej asymptoty, co jest typowe dla zależności typu hiperbolicznego/logarytmicznego.

W odniesieniu do CO₂ (Rys. 20) zależność jest znacznie słabsza. CO₂ w analizowanym zbiorze ma wąski zakres zmienności (około 470-600 ppm w większości przypadków), co ogranicza jego wpływ różnicujący PDW. Widoczna jest jedynie tendencja pośrednia: przy wyższych wartościach CO₂ częściej współwystępują umiarkowane lub wyższe PDW, co wskazuje, że CO₂ pełni raczej rolę zmiennej tła (warunki spalania/akumulacji), a nie bezpośredniego predyktora PDW.

Podsumowując, relacja PDW-PM10 ma charakter silnej, nieliniowej zależności logarytmiczno-hyperbolicznej, natomiast zależność PDW-CO₂ jest słaba i pośrednia, wynikająca głównie ze wspólnych warunków emisji, a nie bezpośredniego związku matematycznego.



Rys. 20. Zależności pomiędzy stężeniami PM10 i CO2 a otrzymanym wskaźnikiem PDW.

4 Ocena przeprowadzonych pomiarów w odniesieniu do stanu bazowego w „hot-spotach”

Średnie wartości stężeń PM₁₀, CO₂, obliczonego PDW oraz PM₁₀ tła zmierzone za pomocą czujników stacjonarnych w 10 wytypowanych „hot-spotach” wyznaczone w S1 określają stan bazowy, będący punktem odniesienia dla pomiarów w kolejnych latach trwania projektu. W Tab. 33 przedstawiono wyniki pomiarów w S2-S4 w odniesieniu do stanu bazowego.

Analiza uzyskanych danych pozwala na sformułowanie następujących spostrzeżeń:

- ❖ Stężenie PM₁₀ bezpośrednio nad emitorem (w strudze spalin) jest średnio ok. 10-krotnie większe od stężenia w tle (biorąc pod uwagę sumaryczną średnią ze wszystkich czterech sezonów). Choć w S1 krotność ta była najwyższa (średnio 16,3), to w S4 spadła do poziomu 5,2, co wynikało jednak nie tyle z drastycznego spadku emisji z kominów, ile z silnego wzrostu zanieczyszczenia tła.
- ❖ Średnie wartości stężeń CO₂ nadal wykazują dużą stabilność i niemal nie różnią się pomiędzy tłem a emitorem (stosunek oscyluje wokół 1,0-1,1), choć w każdym pojedynczym przypadku odczyty w spalinach są wyższe.
- ❖ Średnie wartości tła PM₁₀ mierzone czujnikami stacjonarnymi są z reguły wyższe od danych tła z drona. W S4 średnia stacjonarna wyniosła 88,4 µg/m³, podczas gdy tło z drona osiągnęło swój historyczny maksimum na poziomie 124,7 µg/m³. Pokazuje to, że w S4 doszło do odwrócenia trendu – tło mierzone dynamicznie przez drona przewyższyło odczyty stacjonarne, co może świadczyć o silnym smogu warstwowym (inwersyjnym) na wysokościach lotu drona.
- ❖ Wskaźnik PDW dla tła, który w pierwszych trzech sezonach rósł liniowo (9,7<16,6<20,3), w czwartym sezonie uległ załamaniu i spadł do poziomu 13,1. Przerywa to dotychczasową, liniową tendencję wzrostową tego parametru i wskazuje na wyraźną zmianę dynamiki relacji pomiędzy odczytami nad emitorem a tłem w S4 w odniesieniu do całego wieloletniego trendu projektu.
- ❖ Z kolei dla emitorów wskaźnik PDW po początkowym wzroście (2,0 < 3,2), w S3 i S4 ustabilizował się na poziomie 2,8 i 3,2.

- ❖ Po 4 sezonach pomiarowych dotychczasowi negatywni liderzy ugruntowali swoją pozycję, ale pojawiły się też nowe anomalie:
 - Bojszowy bezsprzecznie pozostają najpoważniejszym punktem krytycznym. W S4 tło z drona osiągnęło tam astronomiczny poziom $365,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, a stacja stacjonarna wskazała $148,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
 - W S4 do grona skrajnie zanieczyszczonych lokalizacji pod kątem tła dołączyły również Koszęcin (tło dron: $149,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Rybnik (tło dron: $138,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, stacja: $116,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Częstochowa (stacja: $142,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) oraz Woźniki (tło dron: $154,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, stacja: $155,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$).
 - Żywiec, który był krytyczny w S2 (tło dron: $157,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, stacja: $151,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$), w S4 wykazał relatywną stabilizację, choć jego wskaźniki emitora ($558,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) wciąż należą do wysokich.
- ❖ Analiza statystyczna potwierdza, że pomiędzy tłem zmierzonym za pomocą drona a danymi z czujników stacjonarnych występuje bardzo wysoka zgodność i silna współzależność. Świadczą o tym wartości współczynnika korelacji Pearsona, które w trzech z czterech sezonów osiągnęły wysokie poziomy: $r^2 = 0,7414$ w S1, $0,8942$ w S2 oraz $0,6959$ w S4. Jedyny przejściowy spadek dopasowania odnotowano w S3 ($r^2 = 0,2754$), jednak powrót do wysokiej korelacji w S4 dowodzi, że była to jedynie krótkotrwała anomalia. W ujęciu sumarycznym dla wszystkich sezonów korelacja pozostaje istotna ($r^2 = 0,7538$). Oznacza to, że niezależnie od specyfiki danego roku czy pojedynczych odchyłeń lokalnych, obie metody pomiarowe rejestrują ten sam ogólny trend zmian. Wzrost wartości stężenia tła zmierzony przez drona w pełni odpowiada wzrostowi stężenia tła na stacjach stacjonarnych i na odwrót. Potwierdza to, że pomiar dronem jest miarodajny i zbieżny z tradycyjnymi, stałymi punktami monitoringu powietrza.

Tabela 33. Zestawienie wartości stężeń PM10 i CO₂ (średnia z 3 dni pomiarowych) zmierzonych w poszczególnych „hot-spotach” za pomocą dronów, ich stosunków (PDW) oraz średnich wartości PM10 zmierzonych za pomocą pomiarów stacjonarnych (średnia z 3 dni podczas godzin pomiarowych dronem). Na zielono zaznaczono zmiany korzystne (dla stężeń spadek, dla PDW wzrost), a na czerwono zmiany niekorzystne (wzrost stężeń i spadek PDW).

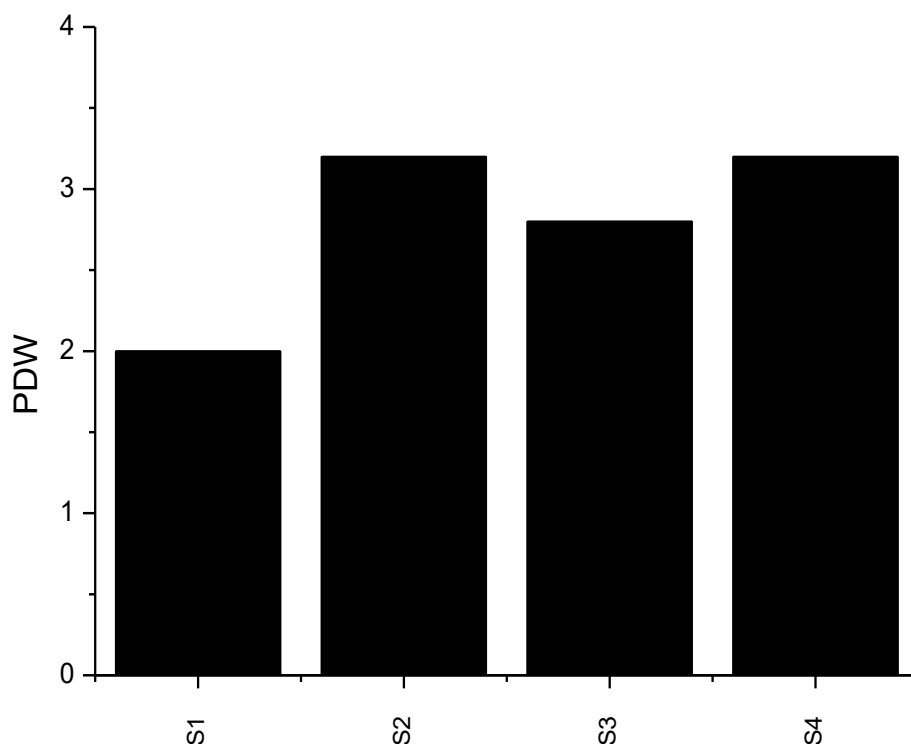
	Sezon 1 (bazowy)								
„Hot-spot”	Pomiar za pomocą drona								Pomiar stacjonarny
	Emitor			Tło			Emitor/tło		PM10 [µg/m ³]
	PM10 [µg/m ³]	CO ₂ [ppm]	PDW	PM10 [µg/m ³]	CO ₂ [ppm]	PDW	PM10	CO ₂	
Miedźno	241.6	586.9	4.1	50.2	578.5	12.6	4.8	1.0	72.1
Koszęcin	382.9	523.6	2.2	56.9	513.5	9.5	6.7	1.0	85.4
Rybnik	333.4	530.8	5.2	34.7	513.1	18.6	8.8	1.0	42.8
W. Górka	633.2	519.3	2.6	37.4	513.9	15.2	16.9	1.0	61.4
Żywiec	497.2	483.1	1.5	84.5	481.1	6.3	5.9	1.0	102.9
Częstochowa	917.1	574.8	0.7	53.1	488.1	4.0	17.3	1.2	37.3
Woźniki	828.0	546.4	0.8	40.6	495.2	5.2	20.4	1.1	84.1
Krzepice	919.7	621.4	0.9	40.5	516.2	5.7	22.7	1.2	51.2
Bojszowy	689.1	631.6	1.1	28.9	544.3	10.5	23.9	1.2	42.9
Ogrodzieniec	884.8	632.8	1.1	25.0	507.7	9.4	35.4	1.2	41.5
Średnia	632.7	565.1	2.0	45.2	515.1	9.7	16.3	1.1	62.2
	Sezon 2								
„Hot-spot”	Pomiar za pomocą drona								Pomiar stacjonarny
	Emitor			Tło			Emitor/tło		PM10 [µg/m ³]
	PM10 [µg/m ³]	CO ₂ [ppm]	PDW	PM10 [µg/m ³]	CO ₂ [ppm]	PDW	PM10	CO ₂	
Miedźno	620.8	597.5	1.7	46.6	578.8	15.6	13.3	1.0	65.3
Koszęcin	684.9	587.0	1.6	29.7	578.8	20.7	23.1	1.0	46.6
Rybnik	739.5	586.1	1.5	65.7	578.8	12.2	11.3	1.0	114.9
W. Górka	306.7	578.7	3.0	45.9	578.6	17.2	6.7	1.0	66.6
Żywiec	680.7	537.2	2.0	157.8	578.7	11.8	4.3	0.9	151.9
Częstochowa	104.2	629.5	7.2	30.6	564.6	19.4	3.4	1.1	27.7
Woźniki	543.2	568.3	9.1	35.9	550.6	42.5	15.1	1.0	27.3
Krzepice	678.1	645.6	3.1	36.7	577.9	17.0	18.5	1.1	39.4
Bojszowy	¹ 171.0	681.6	0.9	400.5	598.4	2.8	2.9	1.1	218.4
Ogrodzieniec	979.1	611.1	1.6	94.6	564.1	7.1	10.4	1.1	39.8
Średnia	525.1	602.3	3.2	94.4	574.9	16.6	9.3	1.0	79.8
	Sezon 3								

„Hot-spot”	Pomiar za pomocą drona								Pomiar stacjonarny
	Emitor			Tło			Emitor/tło		PM10 [µg/m³]
	PM10 [µg/m³]	CO ₂ [ppm]	PDW	PM10 [µg/m³]	CO ₂ [ppm]	PDW	PM10	CO ₂	
Miedźno	317.1	480.6	3.0	23.6	481.0	20.5	13.4	1.0	91.7
Koszęcin	368.9	484.4	2.1	55.0	481.2	8.8	6.7	1.0	67.9
Rybnik	151.0	481.0	3.7	29.7	481.1	17.6	5.1	1.0	53.7
W. Górka	268.4	481.1	4.2	38.0	481.2	28.1	7.1	1.0	75.1
Żywiec	558.5	458.9	1.6	76.8	481.0	12.6	7.3	1.0	87.4
Częstochowa	588.8	628.3	5.0	111.2	596.8	14.2	5.3	1.1	58.1
Woźniki	908.1	610.6	2.3	66.3	573.0	45.7	13.7	1.1	33.7
Krzepice	757.7	635.9	2.2	50.2	595.7	14.0	15.1	1.1	24.8
Bojszowy	160.2	748.8	0.8	230.9	629.3	3.9	5.0	1.2	88.8
Ogrodzieniec	812.6	657.5	3.2	63.9	573.7	38.0	12.7	1.1	24.1
Średnia	589.1	566.7	2.8	74.6	537.4	20.3	9.1	1.0	60.5
Sezon 4									
„Hot-spot”	Pomiar za pomocą drona								Pomiar stacjonarny
	Emitor			Tło			Emitor/tło		PM10 [µg/m³]
	PM10 [µg/m³]	CO ₂ [ppm]	PDW	PM10 [µg/m³]	CO ₂ [ppm]	PDW	PM10	CO ₂	
Miedźno	408.1	579.5	3.8	65.7	578.8	12.4	6.2	1.0	75.0
Koszęcin	702.8	578.9	1.3	149.6	578.8	17.6	4.7	1.0	39.9
Rybnik	335.4	579.4	1.9	138.4	579.5	4.9	2.4	1.0	116.9
W. Górka	176.4	579.3	6.1	29.8	579.4	27.6	5.9	1.0	29.7
Żywiec	558.5	458.9	1.6	76.8	481.0	12.6	7.3	1.0	80.3
Częstochowa	440.2	636.0	3.5	154.2	580.2	7.5	2.9	1.1	142.2
Woźniki	756.2	619.6	1.3	154.6	580.0	4.2	4.9	1.1	155.0
Krzepice	139.6	586.6	9.0	20.9	563.0	34.6	6.7	1.0	43.8
Bojszowy	818.6	635.9	1.1	365.0	593.3	2.1	2.2	1.1	148.7
Ogrodzieniec	813.8	691.0	2.4	91.9	583.2	7.2	8.9	1.2	52.6
Średnia	515.0	594.5	3.2	124.7	569.7	13.1	5.2	1.0	88.4

5 Podsumowanie

W niniejszym etapie pracy kontynuowano kampanię pomiarową (łącznie 30 godzinnych pomiarów w 10 „hot-spotach”) stężeń PM10 i CO₂ w gazach odlotowych, pochodzących z indywidualnych urządzeń grzewczych z wykorzystaniem mobilnych urządzeń pomiarowych zainstalowanych na dronie w czwartym sezonie grzewczym (S4). Zebrane wartości odniesiono do poprzednich trzech analizowanych sezonów.

W przypadku pomiarów z wykorzystaniem dronów do analizy zmian wielkości emisji PM10 w gazach spalinowych zastosowano wskaźnik PDW będący ilorazem stężenia CO₂ oraz pyłu PM10 w punkcie pomiarowym. Jego malejąca wartość wskazuje na zwiększoną zawartość pyłu w strumieniu spalin. Poprawa jakości powietrza na skutek działań samorządów w następstwie wdrażania zapisów śląskiej uchwały „antysmogowej” powinna skutkować zwiększaniem się wartości wskaźnika PDW w kolejnych okresach pomiarowych, co w praktyce powinno być widoczne w postaci przesuwania się wskaźnika PDW w kierunku wyższych wartości na histogramie. Po 4 sezonach pomiarów taki trend jest zauważalny – rejestrowany jest wzrostowa stabilizacja średnich wartości PDW (rys. 21).



Rys. 21. Sezonowe zmiany średnich wartości wskaźnika PDW wyznaczonego dronem nad emitorami oraz w tle.

Stężenia PM10 mierzone w powietrzu w sposób stacjonarny i zestawione w Tab. 33 stanowią wprost podstawę do oceny zmian jakości powietrza w kolejnych latach trwania projektu, po uwzględnieniu wyników pomiarów prowadzonych w kolejnych sezonach grzewczych.

Zmiany wskaźnika PDW będą podstawą do szacowania dynamiki zmian wielkości emisji będących skutkiem realizacji działań naprawczych, w oparciu o analogiczne pomiary planowane w kolejnych etapach.

Dane uzyskane w kolejnych sezonach grzewczych pozwolą na obserwację dynamiki zmian zanieczyszczenia powietrza zarówno w strumieniach gazów odlotowych z kominów gospodarstw domowych (pomiary dronem), jak też w imisji atmosferycznej (pomiary stacjonarne), będących efektem likwidacji wysokoemisyjnych urządzeń grzewczych w ramach realizacji działań naprawczych PL240X-ZSO i związanej z tym poprawy jakości powietrza.