

PFAS w biocie: Kontekst ryzyka i rzetelne rozwiązania analityczne

Analiza bioty (wszystkich organizmów żywych) jako wskaźnika zanieczyszczenia środowiska jest podstawową praktyką znaną jako **biomonitoring** lub **bioindykacja**. Podejście to ocenia jakość środowiska (powietrza, wody, gleby) poprzez badanie reakcji organizmów żywych (bioindykatorów) na zanieczyszczenia środowiskowe. Ze względu na trwałość oraz potencjał bioakumulacji PFAS, ryby i skorupiaki są kluczowymi obiektami takich badań, pełniąc rolę bioakumulatorów, których stężenia w tkankach odzwierciedlają poziom zanieczyszczenia środowiska związkami PFAS.



Rysunek 1: Ilustracja

Obecne i przyszłe przepisy UE

Przepisy prawne UE dotyczące PFAS w biocie stają się coraz bardziej restrykcyjne. Zgodnie z [dyrektywą 2013/39/UE](#) ¹ jedynie PFOS jest ujęty jako substancja priorytetowa w środowisku wodnym, z przypisaną dla bioty (ryb) środowiskową normą jakości (EQS) wynoszącą 9,1 µg/kg masy świeżej. Jednak normy bezpieczeństwa żywności zostały znacząco zaostrzone. Od 2023 r. [rozporządzenie \(UE\) 2023/915](#) ² ustanowiło najwyższe dopuszczalne poziomy dla sumy czterech PFAS (PFOA, PFOS, PFNA i PFHxS) w różnych środkach spożywczych. Chociaż domyślny najwyższy dopuszczalny poziom dla mięsa ryb jest zazwyczaj ustalony na 2,0 µg/kg masy świeżej, rozporządzenie uwzględnia znaczną zmienność międzygatunkową w zakresie bioakumulacji i narażenia środowiskowego. Limity zanieczyszczeń są zróżnicowane w zależności od gatunku, aby odzwierciedlić różne poziomy bioakumulacji. Przykładowo, dla łososia atlantyckiego ustalono próg 5,0 µg/kg, natomiast dla innych gatunków, takich jak sieja czy miętus, wartości progowe mogą sięgać nawet 45 µg/kg. Różnice te uwzględniają odmienne siedliska oraz pozycję w łańcuchu pokarmowym.

Patrząc w przyszłość, UE zmierza w kierunku podejścia grupowego do ochrony środowiska. Proponowana nowelizacja Ramowej Dyrektywy Wodnej rozszerzyłaby monitoring na PFAS jako grupę. Zmiana ta odzwierciedla najnowsze ustalenia naukowe EFSA dotyczące bioakumulacji oraz łącznej toksyczności tych „wiecznych chemikaliów”. Oznacza to przejście od regulowania pojedynczych substancji do zarządzania całą klasą chemiczną, aby zapewnić wysoki poziom ochrony zarówno zdrowia ludzi, jak i ekosystemów wodnych.

Jak PFAS zanieczyszczają biotę

Zanieczyszczenie wody i gleby:

PFAS są uwalniane do środowiska z różnych źródeł, w tym z zakładów przemysłowych, składowisk odpadów oraz pian gaśniczych. PFAS o krótkich łańcuchach są bardzo mobilne i utrzymują się w wodach powierzchniowych oraz podziemnych, natomiast wiele PFAS o długich łańcuchach sorbuje się na materii organicznej i gromadzi w osadach.

Bioakumulacja w wodnym łańcuchu pokarmowym:

Organizmy wodne, takie jak ryby i skorupiaki, absorbują PFAS z wody i oraz ze skażonych źródeł pokarmu, kumulując je w tkankach. To nagromadzenie często nasila się wzdłuż łańcucha pokarmowego (biomagnifikacja), szczególnie w przypadku PFAS o długich łańcuchach (np. PFOS) u ryb drapieżnych.

Zanieczyszczenie zwierząt lądowych:

Na terenach zanieczyszczonych zwierzęta są narażone przez wodę, paszę oraz glebę lub pył. PFAS wiążą się z białkami i kumulują się głównie we krwi oraz w wątrobie skąd mogą przenikać do produktów pochodzenia zwierzęcego, takich jak mleko czy jaja.

Zanieczyszczenie upraw:

Rośliny uprawiane na zanieczyszczonej glebie lub nawadniane zanieczyszczoną wodą mogą pobierać PFAS. Tempo pobierania jest zróżnicowane; PFAS o krótszych łańcuchach są zazwyczaj łatwiej pobierane przez korzenie, co ułatwia ich włączanie do lądowego łańcucha pokarmowego.

► [Ciąg dalszy na następnej stronie](#)
(Jak PFAS zanieczyszczają biotę)

Dodatkowe drogi narażenia i kwestie do rozważenia:

Prekursory PFAS mogą przekształcać się w trwałe kwasy perfluoroalkilowe (PFAA), takie jak PFOS i PFOA, zwiększając z czasem ich poziom w organizmach żywych. Osady oraz organizmy denne stanowią kluczowe drogi narażenia w ekosystemach wodnych. Transport atmosferyczny i depozycja przyczyniają się do zanieczyszczenia gleby i wód; dodatkowo, rolnicze wykorzystanie osadów ściekowych oraz stosowanie zanieczyszczonej wody do nawadniania mogą wprowadzać PFAS do systemów rolniczych.

Wpływ na biotę

Kumulacja w czasie:

Ze względu na stabilność chemiczną i powolne wydalanie wiele PFAS o długich łańcuchach utrzymuje się w organizmach, a ich stężenia mogą z czasem wzrastać. Związki te wiążą się z białkami i mają tendencję do gromadzenia się we krwi i wątrobie, a także w jajach.

Potencjalne skutki zdrowotne:

Narażenie dzikich zwierząt na PFAS wiąże się z osłabieniem układu odpornościowego, zaburzeniami hormonalnymi i funkcji tarczycy, zmianami w metabolizmie lipidów i toksycznym działaniem na wątrobę, a także z skutkami rozwojowymi i rozrodczymi (np. obniżoną skutecznością wykluwania). W odniesieniu do nowotworów Międzynarodowa Agencja Badań nad Rakiem (IARC) klasyfikuje PFOA jako rakotwórczy dla ludzi (grupa 1), a PFOS jako możliwie rakotwórczy dla ludzi (grupa 2B).

Przenoszenie matczyne i wrażliwość na etap rozwoju:

PFAS mogą być przenoszone z osobników dorosłych na potomstwo poprzez jaja i laktację, co sprawia, że wczesne etapy rozwoju są szczególnie podatne na ich działanie.

Monitoring i wzorce biomagnifikacji

Dziki ryby i bezkręgowce na terenie UE wykazują mierzalne poziomy PFAS (PFOS i PFCA) w organizmach, sięgające od kilkudziesięciu do niskich setek µg/kg (masa świeża). Morskie drapieżniki szczytowe często wykazują podwyższone stężenia PFOS w porównaniu z wartościami EQS dla bioty. Wzorce biomagnifikacji różnią się w zależności od związku, jednak kilka PFAS o długich łańcuchach ulega bioakumulacji.

Bibliografia

- Teunen i in.: Akumulacja PFAS w rodzimych i introdukowanych organizmach wodnych z Belgii oraz jej przełożenie na ryzyko dla zdrowia ludzi i ekosystemów. *Environmental Sciences Europe* (2021) 33:39
- Byns i in.: Bioakumulacja oraz transfer troficzny perfluorowanych substancji alkilowych (PFAS) w biocie morskiej z belgijskiej części Morza Północnego: rozmieszczenie oraz implikacje dla ryzyka zdrowotnego ludzi. *Environmental Pollution* 311 (2022) 119907

Metody analityczne

Laboratoria ALS stosują metodę LC–MS/MS akredytowaną zgodnie z ISO/IEC 17025 do oznaczania PFAS w biocie, które stanowią kluczowe wskaźniki zanieczyszczenia środowiska. Metoda ta została rygorystycznie zwalidowana dla szerokiego zakresu matryc, w tym ryb i innych owoców morza (małży, skorupiaków, głowonogów), mięsa, jaj, mleka oraz różnych tkanek roślinnych.



Logistyka i postępowanie z próbkami:

Aby zachować integralność analitów i zapobiec degradacji biologicznej, stosowane są rygorystyczne procedury transportowe. Próbkę należy wysłać przesyłką kurierską z dostawą na następny dzień. W przypadku wysyłki próbek zamrożonych muszą być one transportowane w sposób zapewniający utrzymanie stanu zamrożenia przez cały czas transportu.



Masa próbki:

Chociaż laboratorium może analizować już 10 g próbki, zaleca się dostarczenie 50 g, aby zapewnić jej reprezentatywność. W celu uzyskania stabilnej i jednorodnej porcji badawczej próbki są liofilizowane (suszone sublimacyjnie), a następnie dokładnie homogenizowane. Proces ten stabilizuje matrycę i wstępnie zatęża anality, umożliwiając oznaczenia na poziomie śladowym.



Ekstrakcja i analiza:

Procedura analityczna wykorzystuje zmodyfikowaną ekstrakcję QuEChERS, aby zapewnić efektywny odzysk analitów, a następnie etap oczyszczania metodą ekstrakcji do fazy stałej (SPE) w celu usunięcia interferencji matrycowych. Końcowa separacja i detekcja są prowadzone z wykorzystaniem nowoczesnej aparatury UHPLC–MS/MS (ExionLC™ w połączeniu z SCIEX QTRAP® 6500).



Oznaczanie ilościowe:

Stężenie każdego PFAS jest określane metodą kalibracji z wykorzystaniem wzorców wewnętrznych. Stosunki sygnałów są powiązane ze stosunkami stężeń analitów natywnych oraz odpowiadających im izotopowo znakowanych wzorców wewnętrznych, co zapewnia skuteczną korekcję potencjalnych efektów matrycowych oraz wysoką dokładność i precyzję pomiarów.

► [Ciąg dalszy na następnej stronie](#)
(Lista docelowych PFAS)

SCAN OR CLICK



right solutions.
right partner.

Lista oznaczanych związków PFAS

LOQ: Granica oznaczalności (µg/kg)

Parametr	Skrót	LOQ (µg/kg)
Kwasy perfluoroalkilokarboksylowe		
Kwas perfluorobutanowy	PFBA	1
Kwas perfluoropentanowy	PFPeA	0.1
Kwas perfluoroheksanowy	PFHxA	0.1
Kwas perfluoroheptanowy	PFHpA	0.1
Kwas perfluorooktanowy	PFOA	0.1
Kwas perfluorononanowy	PFNA	0.1
Kwas perfluorodekanowy	PFDA	0.1
Kwas perfluoroundekanowy	PFUnDA	0.1
Kwas perfluorododekanowy	PFDoDA	0.1
Kwas perfluorotridekanowy	PFTTrDA	0.1
Kwas perfluorotetradekanowy	PFTeDA	0.1
Kwas perfluoroheksadekanowy	PFHxDA	0.1
Kwasy perfluoroalkanosulfonowe		
Kwas perfluorobutanosulfonowy	PFBS	0.1
Kwas perfluoropentanosulfonowy	PFPeS	0.1
Kwas perfluoroheksanosulfonowy	PFHxS	0.1
Kwas perfluoroheptanosulfonowy	PFHpS	0.1
Kwas perfluorooktanosulfonowy	PFOS	0.1
Kwas perfluorononanosulfonowy	PFNS	0.1
Kwas perfluorodekanosulfonowy	PFDS	0.1
Kwas perfluoroundekanosulfonowy	PFUnDS	0.1
Kwas perfluorododekanosulfonowy Perfluorododecane sulfonic acid	PFDoDS	0.1
Kwas perfluorotridekanosulfonowy	PFTTrDS	0.1
Perfluoroalkilosulfonamidy		
Sulfonamid perfluorooktanu	PFOSA	0.1
Kwasy sulfonowe fluorotelomerów		
4:2 Kwas sulfonowy fluorotelomeru	4:2 FTS	0.1
6:2 Kwas sulfonowy fluorotelomeru	6:2 FTS	0.1
8:2 Kwas sulfonowy fluorotelomeru	8:2 FTS	0.1
Inne związki PFAS		
2,3,3,3-Kwas tetrafluoro-2- (heptafluoropropoksy)propanowy	HFPO-DA (GenX)	0.1
7H-Kwas perfluoroheptanowy	HPFHpA	0.1
Kwas perfluoro-3,7-dimetylooktanowy	P37DMOA	0.1