



Fundusze Europejskie

Technologie uzdatniania – zgodność z dyrektywą 2020/2184

Ewa Wiśniowska

Politechnika Częstochowska



Fundusze
Europejskie



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską





**Nowe zanieczyszczenia oznaczane
w wodzie – efektywność usuwania
w procesach technologicznych**

Nowe parametry i wyzwania związane z implementacją dyrektywy UE 2020/2184



rozszerzenie listy parametrów wody pitnej (m.in. PFAS, bisfenol A, HAA, mikrocytyna-LR, uran)








konieczność dostosowania technologii uzdatniania do osiągnięcia rygorystycznych wartości dopuszczalnych (rzędu $\mu\text{g}/\text{dm}^3$)



wprowadzenie podejścia opartego na ryzyku – identyfikacja zagrożeń i kontrola procesów uzdatniania w celu zapobiegania nieprawidłowościom

Nowe parametry zanieczyszczeń – charakterystyka

-  **PFAS (ogółem i suma 20)** – „wieczne chemikalia”, tysiące związków per- i polifluoroalkilowych; bardzo trwałe, kumulują się w środowisku. Wartość dopuszczalna suma PFAS niezwykle niska ($0,1 \mu\text{g}/\text{dm}^3$).
-  **Bisfenol A (BPA)** – endokrynnny związek zakłócający gospodarkę hormonalną; nowy parametr chemiczny (wcześniej głównie postrzegany jako problem w wodzie butelkowanej)
-  **HAA (kwasy halogenooctowe)** – uboczne produkty dezynfekcji (UPD) powstające przy chlorowaniu w obecności naturalnej materii organicznej; mogą stanowić problem w systemach z chlorowaniem.
-  **Mikrocystyna-LR** – toksyna sinicowa z zakwitów alg; ryzyko w wodach powierzchniowych (zbiorniki, rzeki) przy masowym rozwoju sinic.
-  **Metale (Pb, Cr, U)** – zaostrzone normy (ołów z 10 do $5 \mu\text{g}/\text{dm}^3$, chrom z 50 do $25 \mu\text{g}/\text{dm}^3$); **uran** dodany jako nowy parametr chemiczny (wcześniej tylko aspekt radiologiczny).



**Efektywność usuwania nowych
zanieczyszczeń w stacjach
uzdatniania wody**

Charakterystyka i toksyczność PFAS

Syntetyczne „wieczyste” związki zawierające trwałe wiązania C–F (np. PFOS, PFOA) . Bardzo trwałe chemicznie i biologicznie – nie ulegają łatwo biodegradacji, mogą się kumulować w organizmach.

Toksyczność: powiązane z zaburzeniami metabolicznymi (np. podwyższony cholesterol), problemami hormonalnymi i rozwojowymi (tarczyca, płodność) oraz większym ryzykiem niektórych nowotworów (np. nerki, jądra).

Część PFAS (PFOS, PFOA) uznana za możliwy czynnik rakotwórczy dla ludzi. WHO zaproponowało tymczasowe wartości dopuszczalne m.in. 100 ng/dm³ dla PFOA i PFOS.

Dyrektywa 2020/2184: 0,50 µg/ dm³ (mikrograma na litr) dla "PFAS ogółem" (czyli całkowitej zawartości wszystkich substancji per- i polifluoroalkilowych) oraz 0,10 µg/ dm³ dla „sumy PFAS" (sumy 20 wybranych, najbardziej niebezpiecznych substancji PFAS, wymienionych w załączniku).

Występowanie PFAS w wodach (PL/EU)

Szeroko rozpowszechnione: PFAS wykrywane w wielu rzekach, jeziorach i wodach podziemnych Europy, np. 51–60% próbek rzek (2018–2022) przekraczało normy środowiskowe dla PFAS.

W Europie zidentyfikowano ~23 000 lokalizacji skażonych PFAS („hotspoty” ~2 300) mogących zagrażać zdrowiu.

W Polsce brak rutynowego monitoringu PFAS – pojedyncze badania (np. Poznań 2025) wykazały śladowe stężenia ($<4 - <1.5 \text{ ng/dm}^3$) w wodociągach, znacznie poniżej norm UE.

Źródła zanieczyszczeń: ścieki komunalne i przemysłowe, spływy z lotnisk (środki gaśnicze), odpady – PFAS migrują do wód gruntowych i powierzchniowych, a produkty ich częściowego rozkładu (np. kwas trifluorooctowy, TFA) przenikają do wód i są trudne do usunięcia.

Usuwanie związków z grupy PFAS – metody, przykłady i regulacje

Metody usuwania:

- adsorpcja na granulowanym węglu aktywnym (GAC)** – skuteczna szczególnie dla PFAS o długich łańcuchach (C8+), słabiej usuwa krótkie PFAS ;
- wymiana jonowa** (żywice anionowe – AIX) – efektywna dla jonowych PFAS (zwł. o krótszych łańcuchach);
- membrany** NF/RO – usuwają większość PFAS (95–99%).

Ograniczenia: GAC i AIX wymagają regeneracji/wymiany (ograniczona pojemność – np. sumarycznie ok. 40 g PFAS/t GAC); **utlenianie konwencjonalne** (ozon, UV) **mało skuteczne** wobec trwałych PFAS – **konieczne zaawansowane procesy** (np. wysokotemperaturowe, reakcje z rodnikami).

Przykłady: region Wenecji (Włochy) – strefa skażenia ~200 km²: stacja uzdatniania (100 tys. mieszkańców) z filtrami GAC osiągała >90% usunięcia PFAS długich (PFOA), ale szybkie przełomy dla krótkich (PFBA, PFBS) . Nowe instalacje łączą GAC z AIX lub membranami dla pełniejszej ochrony .

Regulacje: UE DWD 2020/2184 wymaga monitoringu PFAS; dopuszczalna **suma 20 PFAS: 0,10 µg/dm³**, **PFAS ogółem: 0,50 µg/dm³** . W Polsce brak dotąd norm krajowych (wdrożenie unijnych do 2026) EPA (USA) proponuje znacznie obniżone MCL (<0,004 µg/dm³ dla PFOA/PFOS). WHO (2022) zaleca tymczasowo ≤ 100 ng/dm³ dla PFOA/PFOS indywidualnie.

Charakterystyka i toksyczność HAA

Halogenowane kwasy karboksylowe (gł. chlorowe i bromowe) powstające jako uboczne produkty dezynfekcji chlorowej wody. Typowe „HAA5” obejmują: kwas monochlorooctowy (MCAA), dichlorooctowy (DCAA), trichlorooctowy (TCAA), monobromooctowy i dibromooctowy.

Właściwości: dobrze rozpuszczalne w wodzie, raczej trwałe chemicznie (w temp. pokojowej nie ulegają szybkiej degradacji). Występują zwykle jako aniony przy pH wody ~ 7 .

Toksyczność: przewlekła ekspozycja (powyżej norm) wiązana ze **zwiększonym ryzykiem raka pęcherza i okrężnicy** oraz z **efektami teratogennymi** (uszkodzenia rozwojowe płodu). HAA są **genotoksyczne** – indukują mutacje i uszkodzenia DNA (potwierdzone w badaniach laboratoryjnych). DCAA i TCAA podejrzewa się o działanie rakotwórcze (badania na zwierzętach) – WHO ustanowiła dla nich wytyczne $50 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ (DCAA, wartość tymczasowa) i $200 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ (TCAA). MCAA działa głównie na system nerwowy; WHO zaleca max. $20 \mu\text{g}/\text{dm}^3$

Występowanie HAA w wodach

Źródło: HAA tworzą się przy chlorowaniu naturalnej materii organicznej (NOM) w wodzie. Zawartość HAA rośnie przy wysokiej zawartości związków organicznych, dłuższym czasie kontaktu z chlorem i wyższej temp. wody - największy przyrost w pierwszych godzinach.

Skala w Polsce/Europie: Dotąd brak parametrycznej normy HAA w polskim i wcześniejszym unijnym prawie, więc monitoring jest ograniczony. Badania wskazują jednak na obecność HAA w wodzie w wodociągach stosujących chlor – np. w Krakowie stwierdzono sumarycznie dziesiątki $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ HAA w sieci (mniej niż THM). W badaniach europejskich średnie regionalne stężenia HAA6 w wodach chlorowanych wynosiły 35–95 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$.

Porównanie z innymi DBP: W Europie regulowano dotąd tylko trihalometany (THM) z limitem 100 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ – HAA często występują w zbliżonych poziomach co THM, lecz proporcje zależą od składu NOM i warunków chlorowania. W USA suma HAA5 jest regulowana (MCL 60 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$) od 1998 r.

Usuwanie HAA – metody usuwania, przykłady

Zapobieganie powstawaniu: kluczowe jest usunięcie prekursorów (NOM) przed dezynfekcją. Koagulacja i filtracja – skutecznie usuwa część prekursorów (szczególnie aromatycznych), co obniża tworzenie gł. TCAA i THM. Utlenianie przedchlorowe (ozonowanie) plus filtracja biologiczna może zmniejszyć podatność na tworzenie HAA (poprzez biodegradację NOM).

Usuwanie istniejących HAA: Adsorpcja na węglu aktywnym – GAC może adsorbować HAA (zwł. DCAA, TCAA); notowano >90% usunięcia DCAA/TCAA w filtrach GAC przy odpowiednim czasie kontaktu. Jednak pojemność węgla ograniczona (np. przełom DCAA po ~1 miesiącu pracy kolumny).

Filtry biologiczne (BAC, piaskowe) mogą częściowo rozkładać HAA – ok. 20% redukcji, głównie DCAA.

Wymiana jonowa: anionity mogą usuwać HAA- aniony z wody; w praktyce stosuje się je raczej do usuwania prekursorów (np. żywice MIEX).

Membrany RO/NF – bardzo skuteczne (>95%) w zatrzymywaniu HAA, lecz kosztowne (stosowane punktowo).

Dezynfekcja alternatywna: chlorowanie dwustopniowe lub zastąpienie części chloru chloraminą zmniejsza powstawanie HAA (kosztem innych produktów rozpadu).

Przykład: wodociągi amerykańskie po wprowadzeniu limitu HAA5 $60 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ wdrożyły m.in. węgiel aktywny jako filtr końcowy – np. Miami-Dade (FL) obniżyło HAA5 z ~ 35 do $<20 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ stosując GAC.

BPA (Bisfenol A) - Charakterystyka i toksyczność BPA

Związek organiczny (difenol) stosowany w produkcji tworzyw sztucznych (poliwęglany, żywice epoksydowe).

Źródła w wodzie: może migrować z opakowań i powłok zawierających BPA – np. z plastikowych butelek wielokrotnego użytku, wyściółek puszek, wewnętrznych powłok rur epoksydowych. Obecny też w ściekach komunalnych (z przemysłu i konsumpcji).

Endokrynnie czynny: BPA imituje estrogen – zaburza funkcjonowanie układu hormonalnego. Powiązano go z wpływem na rozród (obniżona płodność, zmiany w jajnikach, feminizacja płodów męskich) , wpływem na rozwój płodu i dzieci (np. wady wrodzone) oraz z zespołem metabolicznym (insulinooporność, predyspozycja do cukrzycy).

Toksyczność ogólna: BPA powoduje reakcje alergiczne skóry, podrażnia oczy i drogi oddechowe. Może oddziaływać na układ odpornościowy (sprzyjać autoimmunizacji). Uznany za SVHC (substancja wzbudzająca bardzo duże obawy) w UE (właściwości zaburzające hormonalnie)

Występowanie BPA w wodach (PL/EU)

W środowisku: BPA wykrywany w wodach powierzchniowych na poziomie ng/dm^3 – typowe stężenia w rzekach $<0,5 \mu\text{g/dm}^3$), np. $0,0005\text{--}0,41 \mu\text{g/dm}^3$ w badaniach europejskich . Wody gruntowe koło składowisk odpadów mogą mieć wyższe stężenia (wymywanie BPA z odpadów).

W wodzie pitnej: główna ekspozycja ludzi pochodzi z żywności (migracja BPA z opakowań), udział wody oceniany na $<2\text{--}5\%$ całkowitego poboru. BPA w wodzie wodociągowej może pojawić się gdy użyto rur/zbiorników z żywicami epoksydowymi zawierającymi BPA – stwierdzano pojedyncze przypadki migracji (zwykle niskie stężenia - ng/dm^3). W butelkowanej wodzie (PET nie zawiera BPA, ale poliwęglanowe galony już tak) także notowano ślady BPA; badanie wykazało, że $>90\%$ populacji europejskiej ma wykrywalne BPA w moczu (pośredni dowód powszechnej ekspozycji).

Polska: brak systematycznych badań BPA w wodach. Normy nie określają dopuszczalnego stężenia w wodzie pitnej. Możliwe źródła to stare sieci z wykładziną epoksydową zawierającą BPA – w nowych regulacjach UE ograniczono migrację BPA z takich materiałów do $\text{max } 2,5 \mu\text{g/dm}^3$

Usuwanie BPA – metody, skuteczność, regulacje

Metody usuwania:

Adsorpcja na węglu aktywnym – bardzo skuteczna (BPA jest hydrofobowy, dobrze wiąże się z porowatym węglem). Wysokie pojemności adsorpcji raportowane (nawet 300–400 mgBPA/g węgla dla specjalnych sorbentów) ; usuwanie >98% możliwe w <2 godz. kontaktu.

Ozonowanie – silnie utlenia BPA (rozrywa pierścienie aromatyczne); pełny rozkład BPA (0,5 mg/dm³) odnotowano w <1 min. przy odpowiedniej dawce ozonu.

UV + H₂O₂ (AOP) – skutecznie mineralizują BPA (UV samo umiarkowanie skuteczne, ale w połączeniu z utleniaczem usuwa >90%).

Filtracja membranowa – NF/RO zatrzymują cząsteczki BPA (>99%), choć rzadko stosuje się je wyłącznie w tym celu.

Przykłady zastosowań: wiele stacji uzdatniania z ozonowaniem i filtrami GAC (instalowanymi głównie w celu poprawy smaku i zapachu) dodatkowo usuwa BPA „przy okazji” – np. wodociąg w Berlinie odnotował spadek BPA ze 150 ng/dm³ w surowej do <5 ng/dm³ po ozonowaniu+GAC (dane literaturowe). W oczyszczalniach ścieków BPA bywa częściowo usuwany (biodegradacja), co zmniejsza dopływ do wód.

Regulacje: Woda pitna – UE wprowadziła limit 2,5 µg/dm³ zawartości BPA w wodzie u odbiorcy (jako wymaganie dla materiałów kontaktujących się z wodą). W produktach konsumenckich: zakaz BPA w butelkach dla niemowląt, ścisłe limity migracji z opakowań żywności (0,05 mg/kg) i od 2025 r. całkowity zakaz BPA w materiałach kontaktujących się z żywnością w UE. WHO nie ma wytycznej dla BPA w wodzie (ze względu na niską ekspozycję z tego źródła), ale EFSA drastycznie obniżyła tolerowane dzienne pobranie (TDI) do 0,2 ng/kg/d (2023) ze względu na nowe dowody zagrożeń.

Mikrocystyna-LR (toksyna sinicowa) - charakterystyka i toksyczność mikrocystyny-LR

Cykliczny peptyd produkowany przez niektóre sinice (cyjanobakterie) podczas zakwitów wód. Mikrocystyna-LR (MC-LR) to najczęściej występująca i najlepiej przebadana z mikrocystyn. Masa cząst. ~994 Da, umiarkowanie rozpuszczalna w wodzie.

Hepatotoksyna: po spożyciu uszkadza wątrobę – hamuje enzymy fosfatazowe w hepatocytach, co prowadzi do rozrywania cytoszkieletu komórek wątroby, krwotoków i martwicy. Ostre zatrucie skutkuje ostrą niewydolnością wątroby, słabsze przewlekłe narażenie może sprzyjać procesom nowotworowym (mikrocystyny uznaje się za możliwe promotory guzów wątroby). Inne efekty zdrowotne: mikrocystyny mogą powodować gorączkę, wymioty, bóle brzucha, a także wpływać na układ immunologiczny (obserwowano zmiany w limfocytach).

IARC sklasyfikowała mikrocystynę-LR jako potencjalnie rakotwórczą (grupa 2B). Dawka śmiertelna dla człowieka oceniana jest na kilkanaście µg/kg (przy spożyciu).

Normy toksykologiczne: WHO ustanowiła zalecaną maksymalną koncentrację 1,0 µg/dm³ MC-LR w wodzie pitnej jako bezpieczną. W Polsce przyjęto ten sam limit (1 µg/dm³) już w 2002 r. jako dopuszczalny poziom w wodzie do picia.

Występowanie mikrocystyny w wodach

Wody powierzchniowe: mikrocystyny pojawiają się podczas zakwitów sinic (masowego rozwoju *Cyanobacteria*) w jeziorach, zbiornikach i wolno płynących rzekach. W ~60–90% zakwitów na świecie stwierdza się toksyny sinicowe (najczęściej właśnie mikrocystyny).

Stężenia w wodzie mogą sięgać kilkudziesięciu $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ podczas silnych zakwitów.

Polska/Europa: zakwity sinic występują latem na wielu zbiornikach (np. Zalew Sulejowski). W 2015 wykryto w Polsce mikrocystyny w 30% badanych kąpielisk śródlądowych, ale poniżej $5 \mu\text{g}/\text{dm}^3$.

Wody powierzchniowe wykorzystywane jako ujęcia wody bywają okresowo zagrożone (np. w Zbiorniku Goczałkowickim odnotowano epizody stężeń MC-LR $\sim 1\text{--}2 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ w wodzie).

W wodzie pitnej: systemy uzdatniania zwykle skutecznie zapobiegają przedostaniu się toksyny do kranu – kluczowe jest, by nie dopuścić do rozpadu komórek sinic (uwolnienie toksyn).

W Polsce obowiązuje monitoring mikrocystyny-LR przy podejrzeniu zakwitu w ujęciu; odsetek przekroczeń normy w wodzie pitnej jest bardzo niski (sporadyczne przypadki).

Nowa dyrektywa UE wymienia mikrocystynę-LR jako parametr, który należy badać w wodzie, jeśli ocena ryzyka wskaże na możliwość wystąpienia

Usuwanie mikrocystyny – metody, skuteczność i przykłady

Usuwanie komórek sinic: najpierw należy usunąć/przecedzić same sinice (zanim rozpadną się i uwolnią toksynę).

Koagulacja + sedymentacja/filtracja – skutecznie usuwa całe komórki (efektywność >95% przy prawidłowej eksploatacji) .

Flotacja (DAF) – bardzo skuteczna dla unoszących się sinic (usuwa większość biomasy przed filtracją).

Filtry membranowe MF/UF – zatrzymują komórki, ale wymagają częstego płukania by uniknąć lizy na membranie .

Usuwanie toksyny rozpuszczonej:

Utlenianie: chlor (wolny chlor) **efektywnie rozkłada mikrocystynę** (przy dawce zależnej od pH i temperatury) ;

ozon – **bardzo skuteczny** (szybkie niszczenie MC-LR) ; nadmanganian potasu – skuteczny dla mikrocystyn.

UV – nieskuteczne w typowych dawkach, ale **UV/peroksydacja** – działa (AOP utleniają MC-LR).

Adsorpcja na węglu aktywnym: pylisty węgiel aktywny (PAC) – wymaga dość wysokich dawek (>20 mg/dm³) przy dużej zawartości NOM, najlepiej sorbenty o dużych porach (węgle drzewne); **GAC** – skuteczny, ale wymaga regularnej wymiany/regeneracji złoża w sezonie zakwitów.

Membrany NF/RO – usuwają mikrocystyny (>90%), choć rzadko instalowane specjalnie w tym celu .

Przykłady zastosowań: wiele stacji uzdatniania zagrożonych toksynami wdrożyło PAC dozowany sezonowo (np. WTP Lake Erie w USA) – PAC 20–30 mg/dm³ usunął >90% MC-LR . Po kryzysie wodnym w Toledo (2014, USA) zainstalowano pełnoskalowe ozonowanie oraz filtry GAC – od tego czasu wodociąg utrzymuje <0,3 µg/L MC-LR nawet przy zakwicie w jeziorze. W Finlandii małe wodociągi korzystają z membran UF i lamp UV, co skutecznie zabezpiecza przed sinicami.

Regulacje: WHO i Polska: 1,0 µg/dm³ MC-LR w wodzie pitnej jako wartość dopuszczalna UE DWD 2020: parametryczne 1 µg/dm³ (monitoring na zasadzie ryzyka). Woda kąpieliskowa – WHO zaleca <20 µg/dm³ jako poziom alarmowy. Polska ujęła w przepisach konieczność badania mikrocystyn przy zakwitach od 2002 r., co czyni nas prekursorem w UE.

Charakterystyka i toksyczność uranu

Metal ciężki, radioaktywny. W wodach występuje głównie w formie jonowej U(VI) (jako jony uranylowe lub kompleksy z węglanami). Bezbarwny, bez smaku i zapachu w wodzie.

Toksyczność chemiczna: nefrotoksyczny – kumuluje się w nerkach, uszkodzając kanaliki nerkowe (upośledza funkcje filtracyjne i może prowadzić do przewlekłej niewydolności nerek).

Toksyczność radiologiczna: wszystkie izotopy uranu są promieniotwórcze (alfa-emiter).

Przewlekłe spożycie podnosi ryzyko nowotworów (rak płuc, kości) – uran jest uznanym czynnikiem rakotwórczym. W typowych stężeniach w wodzie głównie działa na nerki i jest dominującym zagrożeniem nad dawką promieniowania.

Normy toksykologiczne: WHO (wyd. 2011) – tymczasowa wartość dopuszczalna $30 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ oparta na badaniach epidemiologicznych (zmiany w funkcji nerek). Dawka referencyjna EPA odpowiada $\sim 0,5 \mu\text{g}/\text{kg m.c.}/\text{dzień}$. Uran wchłaniany z wody w $\sim 5\text{--}15\%$, reszta wydalana.

Występowanie uranu w wodach (PL/EU)

Naturalne tło: uran występuje w skałach (gleby granitowe, łupki, fosforany). W wodach gruntowych o odczynie zasadowym tworzy rozpuszczalne kompleksy (np. uranyl-węglan).

Obszary o podwyższonym stężeniu: Skandynawia i rejony granitowe Europy (Finlandia, Szwecja, Czechy, Niemcy) – tam wody ze studni wierconych często zawierają uran $>30 \mu\text{g}/\text{dm}^3$. Notowano wyjątkowo wysokie stężenia w południowej Finlandii (studnie głębinowe nawet setki $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ U). W Polsce lokalnie na Dolnym Śląsku i Podlasiu wykrywano podwyższony uran w studniach (związany z złożami rud uranu i fosforu).

Woda wodociągowa: większość dużych ujęć w Polsce wykazuje uran na poziomie $<5 \mu\text{g}/\text{dm}^3$. W krajach jak Finlandia $\sim 4\%$ populacji korzysta z wody przekraczającej $30 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ (gł. prywatne studnie) – stąd programy informacyjne i dofinansowanie filtrów domowych.

Woda butelkowana rzadko zawiera wykrywalny uran (mineralne zazwyczaj $<2 \mu\text{g}/\text{dm}^3$).

Usuwanie uranu – metody, skuteczność, regulacje

Metody usuwania:

Wymiana jonowa (anionit) – bardzo skuteczna (uran występuje jako anionowy kompleks w wodach obojętnych, silnie wiązany przez żywice typu SBA). W instalacjach domowych i stacjach stosuje się anionity selektywne dla uranu – usuwają $> 90\%$ U, ale żywice trzeba regenerować i bezpiecznie utylizować zużyty roztwór.

Adsorbenty na bazie tlenków żelaza/aluminium – np. złoża odmanganiające lub przeciwarzenowe – sorbuje uran poprzez wymianę z grupami OH (skuteczność wysoka, do niskich $\mu\text{g}/\text{dm}^3$). Sorbent (np. piroluzyt) wymaga wymiany po wyczerpaniu i stanowi odpad promieniotwórczy.

Odwrócona osmoza (RO) – usuwa $> 95\%$ uranu; stosowana w filtrach domowych i niektórych stacjach (np. na Florydzie).

Koagulacja i filtracja – może usunąć część uranu jeśli strąca się wodorotlenki lub fosforany uranylu (rzadko celowo stosowane, raczej efekt uboczny).

Zmiękczenie wapnem – obniża stężenie uranu poprzez współstrącanie z węglanem wapnia.

Elektrokoagulacja – testowana w oczyszczaniu wód kopalnianych, może redukować U o 80–90% (na elektrodach Al/ Fe).

Przykłady: W Finlandii tysiące gospodarstw z własnymi studniami zainstalowało małe filtry anionitowe – badania wykazały spadek U z $\sim 100 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ do $< 5 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ po filtrze. W Czechach (Jachymów) wodociąg z wysokim U ($\sim 40 \mu\text{g}/\text{dm}^3$) wykorzystuje filtr z materiałem żelazowym – uran adsorbuje się, a filtr wymieniany jest co kilka miesięcy. W USA normy zawartości uranu ($30 \mu\text{g}/\text{dm}^3$) wymusiły modernizację kilkudziesięciu systemów – np. w Kansas zainstalowano jednostki RO.

Regulacje: UE DWD 2020 wprowadza parametr uran - $30 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ w wodzie pitnej. Polska wcześniej miała surowszą wartość $15 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ (w przepisach do 2017), obecnie dostosowuje do $30 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ WHO (2011) – $30 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ jako zalecenie. US EPA ustanowiła MCL $30 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ (co odpowiada $20 \text{ pCi}/\text{dm}^3$ aktywności). Uran podlega też przepisom radiologicznym – łączna aktywność alfa w wodzie nie powinna przekraczać $0,5 \text{ Bq}/\text{dm}^3$ (co odpowiada ok. $7,5 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ ^{238}U).



**Identyfikacja miejsc krytycznych
w uzdatnianiu wody (nadzór PIS)**

Miejsca krytyczne i nadzór PIS

Miejsce krytyczne w procesie uzdatniania wody to etap lub element systemu, którego nieprawidłowe działanie może bezpośrednio doprowadzić do pogorszenia jakości wody.

Jest to punkt, gdzie brak kontroli skutkuje ryzykiem dla konsumentów. Pojęcie to nawiązuje do krytycznych punktów kontrolnych (CCP) z systemu HACCP, stosowanego obecnie w zarządzaniu bezpieczeństwem wody.

Organy Państwowej Inspekcji Sanitarnej powinny koncentrować nadzór na tych właśnie kluczowych miejscach.

Ich identyfikacja pozwala skierować działania kontrolne tam, gdzie potencjalne zagrożenia są największe.

Celem jest zapobieganie sytuacjom, w których do odbiorców trafia woda niezdatna do spożycia.

Inspektorzy PIS w ramach podejścia opartego na ryzyku muszą wiedzieć, które punkty procesu są newralgiczne, aby tam weryfikować procedury i parametry.



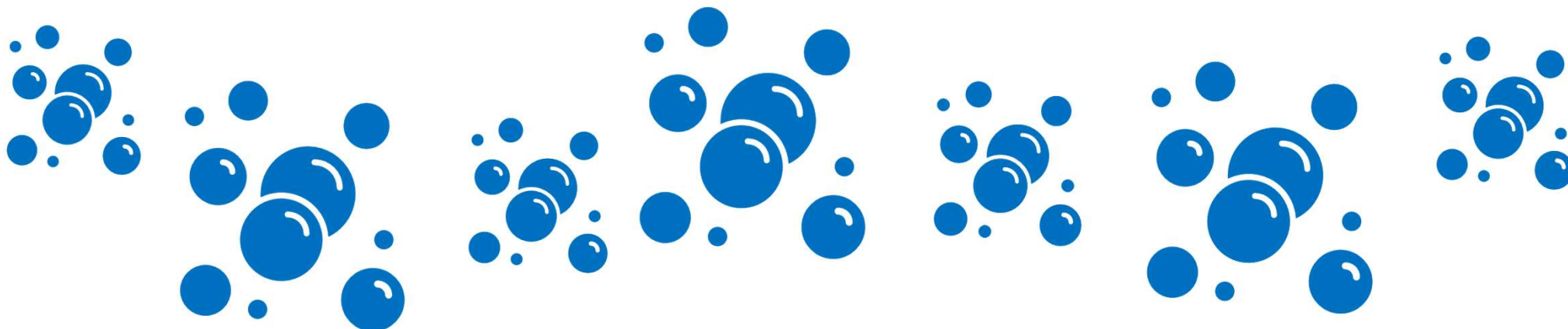
Proces uzdatniania – kluczowe etapy technologiczne

W typowej stacji uzdatniania wody każdy z procesów jednostkowych stanowi barierę usuwającą określone zanieczyszczenia.

Krytyczne punkty technologiczne to te etapy, gdzie awaria lub błąd powoduje przepuszczenie zagrożeń/ zanieczyszczeń dalej.

Z punktu widzenia PIS, szczególnie istotne są:

koagulacja/sedymentacja, filtracja i dezynfekcja!



Koagulacja/ sedymentacja

Dodanie koagulantu (np. siarczanu glinu) jest krytyczne dla usuwania zawieszin i części zanieczyszczeń chemicznych. **Potencjalny błąd:** niewłaściwe dozowanie – zbyt mała dawka powoduje niedostateczne usunięcie zmętnienia (wysoka mętność chroni mikroby przed dezynfekcją), za duża może powodować zbyt wysoki poziom glinu w wodzie lub kłopoty eksploatacyjne.

Przykładem tragicznej pomyłki jest incydent w Camelford (Wlk. Brytania, 1988) – dostawca przez pomyłkę wlał 20 ton siarczanu glinu do niewłaściwego zbiornika, co poskutkowało 3000-krotnym przekroczeniem stężenia tego koagulantu w wodzie pitnej. Woda stała się czarna, żrąca – mieszkańcy od razu zauważyli efekt (sklejanie włosów, rany w jamie ustnej), a wiele osób rozchorowało się.



błąd na etapie koagulacji może natychmiast stworzyć zagrożenie chemiczne na dużą skalę

Z perspektywy PIS: inspektor sprawdzi, czy system dozowania jest automatyczny i czy ma zabezpieczenia przed przedawkowaniem, jak są szkoleni operatorzy w reagowaniu na alarmy, czy pojemniki chemikaliów są właściwie oznakowane itp.

Filtracja

Filtry usuwają zawiesiny, cysty pierwotniaków (*Cryptosporidium*, *Giardia*) i część bakterii.

Miejsce krytyczne: np. nieskuteczne płukanie filtra może skutkować przedostaniem się nieoczyszczonej wody do odpływu.



W praktyce zdarzały się sytuacje, że eksploatacja filtra poza zalecany czas (przeładowanie osadem) powodowała wzrost mętności wody po filtrze – a to oznacza ryzyko obecności mikroorganizmów. Krytyczny jest również stan materiału filtracyjnego – zanieczyszczony lub skolmatowany filtr przestaje być barierą.

Kontrola PIS: dokumentacja pracy filtrów (ciśnienie, czas filtracji, pomiary mętności za filtrami) oraz procedury płukania. W planach bezpieczeństwa wody filtry są często wyróżnione jako CCP (Critical Control Point) – np. przekroczenie mętności $> 0,3$ NTU po filtrze to sygnał alarmowy, który wodociągi muszą raportować i reagować (np. nie dopuścić wody do sieci). Inspektor oceni, czy takie mechanizmy są wdrożone.

Kluczowa rola dezynfekcji

Dezynfekcja ostatnią barierą mikrobiologiczną w stacji uzdatniania wody. Jeśli procesy wcześniej zawiodą i np. do wody trafiają patogeny, tylko prawidłowa dezynfekcja może je unieszkodliwić. **Wiele najpoważniejszych incydentów wynikało z nieskutecznej dezynfekcji w połączeniu z wcześniejszym błędem (np. awaria filtra + niski chlor = skażenie).**

Dlatego PIS bardzo ściśle powinien nadzorować parametry dezynfekcji (stężenie chloru w sieci, czas kontaktu w stacji).

Parametry kontrolne i alarmy

Na stacji uzdatniania powinny być monitorowane online parametry kluczowe: mętność, chlor, pH, redox, itp. Ponieważ sygnalizują problemy.

Np. wzrost mętności wody uzdatnionej może oznaczać problem z koagulacją lub filtrem – jest to sygnał z punktu krytycznego, na który operator musi natychmiast reagować (wstrzymanie produkcji, korekta procesu) i powiadomić PIS, jeśli woda potencjalnie nie spełnia wymogów.

W dobrych systemach wdraża się automatyczne systemy wczesnego ostrzegania i awaryjnego zatrzymania dopływu wody, co minimalizuje ryzyko dostarczenia skażonej wody do sieci. Zadaniem inspektora jest ocena skuteczności tych zabezpieczeń i tego czy personel stacji jest odpowiednio przygotowany do działania w sytuacjach alarmowych.

Ograniczenia technologii i krytyczne parametry operacyjne

Koagulacja/sedymentacja – wymaga optymalnego pH i dawki koagulantu; wrażliwa na zmiany jakości surowej wody (np. nagły wzrost mętności/związków organicznych). Krytyczne parametry: pH, alkaliczność, stężenie koagulantu, czas mieszania.

Filtracja powolna/szybka – kluczowa jest prędkość filtracji i cykliczne płukanie filtrów. Jeśli przepływ jest za duży lub filtr zaniedbany – ryzyko przebicia (wzrost mętności wody po filtrach). Mętność filtratu jest podstawowym parametrem kontrolnym (wymóg $<0,3$ NTU ciągle monitorowany).

Dezynfekcja chlorem – wymaga odpowiedniego CT (stężenie \times czas kontaktu) zależnego od temperatury i pH; przy zbyt niskim stężeniu – nieskuteczna inaktywacja, przy zbyt wysokim – powstają uboczne produkty (THM, HAA). Ważny ciągły pomiar resztkowego chloru.

Węgiel aktywny (GAC/PAC) – ograniczona pojemność sorpcyjna (konieczna regeneracja/wymiana); wrażliwy na konkurencję naturalnej materii organicznej (NOM) – przy wysokim TOC zdolność usuwania mikrozanieczyszczeń spada. Monitoring: czas pracy filtrów GAC, pomiary stężeń zanieczyszczeń za filtrem (przebicie).

Ograniczenia technologii i krytyczne parametry operacyjne

Membrany – wrażliwe na fouling (zatykanie przez zawiesiny, biofilm lub kamień). Wymagają podczyszczania (np. filtracji wstępnej. Krytyczne parametry: ciśnienie transmembranowe (wzrost sygnalizuje zanieczyszczenie), integralność membran (testy szczelności – np. marker/tracer). Konieczne regularne czyszczenie chemiczne – agresywne chemikalia, popłuczyny.

Ozonowanie – wymaga stałej kontroli dawki ozonu i jakości wody (np. bromki utrudniają dozowanie: bromki → bromiany, niebezpieczne). Ozon łatwo ulega rozpadowi – potrzebny odpowiedni czas kontaktu. Konieczna późniejsza dezynfekcja uzupełniająca (np. chlorowanie).

UV – skuteczność zależy od transmisyjności UV wody (niska przy mętnej/kolorowej wodzie). Wymagane regularne czyszczenie lamp z osadów i kamienia. Konieczna redundancja lamp (awaria zasilania lub zużyta lampa = brak dezynfekcji). Konieczna późniejsza dezynfekcja uzupełniająca (np. chlorowanie).

AOP – proces złożony (kombinacja UV, ozonu, nadtlenu wodoru itp.). Wysokie koszty energii i reagentów. Krytyczne parametry: m.in. dozowanie utleniaczy (H_2O_2) dobrane do oczekiwanego efektu (np. usunięcia mikrozanieczyszczeń). Trzeba kontrolować produkty uboczne (np. ozon + bromki → bromiany).

Punkty wrażliwe na awarie i nieprawidłowości

Koagulacja/Flokulacja: Awaria dozownika koagulantu lub błąd dawkowania – brak skutecznego usunięcia zmętnienia i NOM, prowadzi do wzrostu mętności za filtrami i potencjalnie do przekroczeń THM/ HAA (więcej prekursorów przepływa dalej).

Filtracja: Przebicie filtra (np. zbyt długi cykl bez płukania, złoża zużyte) – nagły wzrost mętności i mikroorganizmów w wodzie uzdatnionej. Wskaźnik: mętność $> 0,3$ NTU sygnalizuje problem. Powrót popłuczyn bez pełnego oczyszczenia może wprowadzić zanieczyszczenia wtórne.

Dezynfekcja: Brak chloru w sieci (np. awaria pompy dozującej, wyczerpanie zapasu chloru) – ryzyko natychmiastowego skażenia mikrobiologicznego. Nadmierna dawka chloru – przekroczenia parametrów, chloru wolnego, powstanie chloranów/chlorynów, skargi na zapach/smak.

Węgiel aktywny: Zużycie/wyczerpanie złoża – przełom zanieczyszczeń (np. nagły wzrost poziomu mikrozanieczyszczeń w wodzie po filtrach GAC). Trudność wykrycia bez specjalistycznych analiz – konieczny monitoring wskaźnikowy (np. UV254, DOC – rozpuszczony węgiel organiczny).

Membrany: Przerwanie integralności membrany (pęknięcie, nieszczelność uszczelki) – nagły spadek ciśnienia lub wzrost przewodności produktu sygnalizuje przedostawanie się surowej wody do permeatu.

Awaria zasilania lub pomp wysokiego ciśnienia: brak produkcji wody (konieczność obejścia lub posiadania zapasów).

Punkty wrażliwe na awarie i nieprawidłowości

Ozonator: awaria generatora ozonu – utrata kluczowego utleniania (np. mikrocystyny nieusunięte, pogorszenie smaku/zapachu). Możliwość przedostania się ozonu do powietrza – wymóg systemów bezpieczeństwa (czujniki O₃).

UV: zanik napięcia – natychmiastowe przerwanie dezynfekcji (konieczne systemy UPS/ bypass do chlorowania).

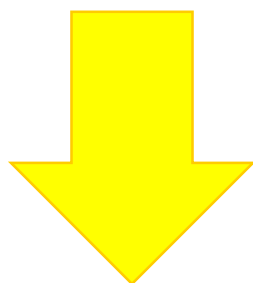
Degradacja lampy: spadek dawki UV (monitorowanie natężenia promieniowania i godzin pracy lamp).

AOP: błędy w dozowaniu reagentów (np. H₂O₂) – niewystarczające usuwanie zanieczyszczeń lub generowanie niepożądanych produktów. Wysoka komplikacja systemu zwiększa ryzyko błędu operatorskiego.

Proceduralne punkty krytyczne (czynniki ludzkie)

Nawet najlepsza technologia zawiedzie, jeśli obsługa popełni błąd lub procedury będą niewłaściwe.

Czynnik ludzki przenika wszystkie wcześniejsze punkty krytyczne: to ludzie kalibrują dozowniki, odczytują alarmy, podejmują decyzję o zamknięciu ujęcia czy zgłoszeniu sytuacji kryzysowej.



W nadzorze PIS ogromną wagę powinno się przykładać do oceny systemu zarządzania bezpieczeństwem w przedsiębiorstwie wodociągowym – kwalifikacji personelu, instrukcji postępowania, kultury bezpieczeństwa.

Typowe błędy operatorskie

Ignorowanie alarmów, np.

- ☐ **alarm niskiego stężenia chloru** - dyżurny go wycisza zakładając, że to błąd czujnika – a tymczasem do sieci może płynąć woda niedostatecznie dezynfekowana.
- ☐ **sygnał o zanieczyszczonej wodzie surowej (np. detektor VOC czy wzrost mętności)** - nie skutkuje żadną reakcją, bo “zawsze tak bywa po deszczu”.

Takie zaniechania często wynikają z braku odpowiednich procedur lub doświadczenia złej rutyny.

Przykład: W kanadyjskim Walkerton (2000) operatorzy zignorowali fakt skażenia studni bakteriami E. coli O157 po ulewnych deszczach – nie zwiększyli chlorowania ani nie powiadomili mieszkańców. W efekcie setki osób zachorowały na krwawą biegunkę, a 7 zmarło. Dochodzenie wykazało także fałszowanie zapisów chlorowania przez obsługę wodociągu.

Typowe błędy operatorskie

Niewłaściwe działania przy awarii:

Gdy coś idzie nie tak, kluczowe jest szybkie wdrożenie planów awaryjnych (zamknięcie dopływu, komunikat do ludności, dodatkowa dezynfekcja). **Opóźnienia lub błędne decyzje eskalują skutki.**

- ☐ w incydencie Nokia 2007, początkowo objawy chorobowe mieszkańców tłumaczono “zwykłą infekcją”, opóźniono ostrzeżenie, a mieszkańcy przez kilka dni pili zanieczyszczoną wodę .
- ☐ w Camelford z kolei personel firmy wodociągowej przez 2 tygodnie zataił informację o wlewniu chemikaliów do wody, uspokajając ludzi, że woda jest bezpieczna – co podważyło zaufanie na lata.

Dlatego PIS powinien wymagać od wodociągów posiadania procedur awaryjnych i ich ćwiczenia.

Inspektor powinien zapytać: “Jakie działania podejmie zakład, jeśli wykryjecie *E. coli* w wodzie? Proszę pokazać instrukcję.

Typowe błędy operatorskie

Szkolenia i kultura bezpieczeństwa:

Czasem błąd wynika z braku wiedzy. Nowy pracownik może nie rozumieć, jak groźny jest np. spadek ciśnienia w sieci i nie zareaguje adekwatnie. **Stąd w dokumentacji powinna być sekcja dotycząca kompetencji personelu.**

PIS powinien sprawdzać, czy załoga stacji ma aktualne szkolenia z zakresu higieny wody, czy jest wyznaczona osoba odpowiedzialna za jakość wody. **W dobie przechodzenia na podejście oparte na ryzyku, kultura organizacyjna przedsiębiorstwa wodociągowego musi się zmienić z reaktywnej (“spełniamy tylko minimum norm”) na proaktywną (“sami identyfikujemy ryzyka i im zapobiegamy”).**

Superwizja i audyty wewnętrzne: Dobre przedsiębiorstwa same prowadzą wewnętrzne audyty krytycznych punktów i wyciągają wnioski.

PIS może zalecać wprowadzanie takich mechanizmów, a jeśli firma tego nie robi – inspektor tym bardziej musi wnikliwie kontrolować.



**Powiązanie z podejściem opartym
na ocenie ryzyka**

Powiązanie z podejściem opartym na ocenie ryzyka

Miejsca krytyczne w podejściu opartym na ocenie ryzyka: W ramach oceny ryzyka zespół pracowników przedsiębiorstwa wodociągowego wykonuje analizę, na podstawie której wyznaczane są krytyczne punkty kontrolne (CCP) – czyli miejsca/procesy, gdzie kontrola jest niezbędna dla bezpieczeństwa wody. **Jeżeli proces oczyszczania jest uznany za miejsce krytyczne, musi mieć określone parametry do monitorowania i krytyczne limity.**

Przykład: dezynfekcja chlorowa może być CCP z limitem “chlor resztkowy na wyjściu $\geq 0,3$ mg/dm³ – co oznacza, że spadek poniżej tego poziomu wymaga natychmiastowej reakcji (np. zatrzymanie pompowni, powiadomienie inspektora).

Ocena ryzyka precyzuje też monitoring w tych punktach (częstotliwość pomiarów, sposób rejestracji) oraz działania korygujące (co zrobić, gdy limit przekroczony). Zawiera również plany awaryjne na wypadek zdarzeń niebezpiecznych.

Powiązanie z podejściem opartym na ocenie ryzyka

Rola Inspekcji:

Po nowelizacji prawa w celu implementacji do dyrektywy 2020/2184 inspektorzy powinni potrafić oceniać ryzyko i weryfikować czy opisane środki zapobiegawcze i kontrolne są adekwatne.

Przed wszystkim jednak ocena ryzyka ma stać się narzędziem ukierunkowania nadzoru: inspektor wie z oceny ryzyka, jakie punkty przedsiębiorstwo wodociągów uznało za krytyczne i jak je należy nadzorować – może zatem skupić kontrolę na sprawdzeniu tych właśnie elementów.

Jeśli ocena ryzyka jest rzetelnie zrobiona, staje się *mapą ryzyka dla nadzoru* – co bardzo ułatwia pracę (koniec z kontrolowaniem “na ślepo” czy tylko rutynowo).