



POLSKIE ZRZESZENIE
INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW
SANITARNYCH

Gaz Woda i Technika Sanitarna

Gas Water & Sanitary Engineering

Artykuł dostępny / Open Access: www.gwits.pl

Przegląd wybranych metod usuwania zanieczyszczeń pochodzących z PVC w środowisku wodnym

Review of selected methods for removal of PVC additives from aqueous environments

Patryk Piskorski¹ , Justyna Szerement¹ , Beata Kowalska^{1*} 

¹ Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Lubelska

*Kontakt / Correspondence: b.kowalska@pollub.pl

Streszczenie:

Polichlorek winylu (PVC) jest szeroko stosowanym tworzywem sztucznym. Dodaje się do niego substancje mające na celu poprawę jego właściwości. Do substancji tych należą stabilizatory, środki opóźniające palność oraz plastyfikatory, wśród których znajdują się związki szkodliwe dla roślin, zwierząt i ludzi. Brak chemicznego wiązania tych dodatków ze strukturą polimeru skutkuje łatwym ich wymywaniem do środowiska. Pojawia się potrzeba usuwania ich ze środowiska wodnego. Artykuł stanowi przegląd wybranych metod usuwania zanieczyszczeń pochodzących z PVC z wody pod względem ich skuteczności, zalet, wad i potencjalnych problemów, które mogą pojawić się w trakcie ich stosowania.

Słowa kluczowe: polichlorek winylu, dodatki do PVC, oczyszczanie wody, ftalany, stabilizatory

Abstract:

Polyvinyl chloride (PVC) is a widely used plastic. There are substances added to it in order to improve its properties. Those substances are stabilizers, flame retardants and plasticizers, which include chemicals toxic for plants, animals and humans. A lack of chemical bonding of these additives to a polymer structure results in easy leaching into the environment. There is a need for methods for removing them from aquatic environment. This article provides an overview of selected methods for removal of PVC contaminants from water in terms of efficiency, advantages, disadvantages and potential problems that can occur when using them.

Keywords: polyvinyl chloride, PVC additives, water treatment, phthalates, stabilizers

Wykaz skrótów

BBP	ftalan benzylu butylu	DnOP	ftalan di-n-oktylu
DBP	ftalan dibutylu	FR	flame retardants, środki opóźniające palność
DCHP	ftalan dicykloheksylu	MTM	merkaptid metylocyny
DEHP	ftalan di-2-etyloheksylu	PAEs	phthalic acid esters, estry kwasu ftalowego, ftalany
DEP	ftalan dietylu	PVC	Polichlorek winylu
DiBP	ftalan diizobutylu	TCEP	fosforan tris(2-chloroetylu)
DIDP	ftalan diizodecyłu	UV-326	2-(3-tert-butylo-2-hydroksy-5-metylofenylo)-5-chlorobenzotriazol
DINP	ftalan diizononyłu	UV-328	2-(3',5'-di-tert-amylu-2'-hydroksyfenylo)benzotriazol
DMP	ftalan dimetylu		
DnBP	ftalan di-n-butylu		

1. Wstęp

Polichlorek winylu (PVC) jest jednym z najczęściej stosowanych, a jednocześnie jednym z najstarszych tworzyw sztucznych

na świecie [1]. Jego historia rozpoczęła się w 1835 roku, odkryciem przez Liebiga i Regnaulta chlorku winylu, którego polimeryzację indukowaną światłem zaobserwował Baumann w 1878. Kolejne badania i odkrycia pozwoliły na uruchomienie produkcji

Artykuł / Article: Nadesłany / Received: 11.04.2026; Zrecenzowany / Revised: 30.04.2026; Zaakceptowany / Accepted: 4.05.2026; Opublikowany / Published: 27.05.2026

Prawa autorskie: © 2026 autorów. Licencjodawca: PZITS. Artykuł w otwartym dostępie na licencji Creative Commons CC BY 4.0. / Copyright: © 2026 by the authors. Licensee PZITS. This article is an open access under the Creative Commons CC BY 4.0 license.

na skalę przemysłową w latach 30 XX wieku. Od tamtego czasu produkcja wzrosła z kilkuset ton rocznie do 31 milionów ton w roku 2000 [2], a w 2022 roku ta wartość osiągnęła 60 milionów ton [3].

W celu poprawy właściwości polimeru lub nadania mu pożądanych cech, np. elastyczności, dodaje się do niego dodatki, takie jak plastyfikatory, stabilizatory chroniące tworzywo przed promieniowaniem UV, czy środki opóźniające palność [4]. Substancje te nie są chemicznie związane ze strukturą PVC, co skutkuje łatwym ich wymywaniem i przedostawaniem się do środowiska [5]. Są wykrywane m.in. w rzekach [6], wodzie morskiej [7] i wodzie przeznaczonej do spożycia [8].

Obecność dodatków do PVC w środowisku może skutkować bioakumulacją tych substancji w organizmach roślinnych i zwierzęcych. Niektóre z nich wykazują działanie neurotoksyczne, reprotoksyczne, zaburzające pracę układu hormonalnego [9], rakotwórcze [10]. Mogą prowadzić do uszkodzeń DNA [11]. Mogą również być toksyczne dla roślin [12]. Akumulacja w roślinach [5] i zwierzętach, takich jak ryby [13], z których przygotowuje się żywność, oraz obecność w wodzie przeznaczonej do spożycia może zwiększać ilości toksycznych substancji przyjmowanych przez człowieka.

Zagrożenie przenikaniem stabilizatorów, środków opóźniających palność i plastyfikatorów do środowiska oraz ich negatywny wpływ na rośliny, zwierzęta i ludzi skutkują potrzebą usuwania dodatków do PVC z wody. Istnieje wiele metod usuwania zanieczyszczeń, np. adsorpcja, filtracja, zaawansowane procesy utleniania czy biodegradacja. Wykorzystują one szeroki zakres dostępnych materiałów i technik, pozwalający na optymalizację metod pod kątem konkretnych zanieczyszczeń. Umożliwiają również degradację substancji odpornych na tradycyjne metody oczyszczania wody [14].

Poszczególne metody mogą się charakteryzować niskim kosztem i łatwością użycia, możliwością całkowitej degradacji zanieczyszczeń czy ponownego użycia zastosowanych materiałów. Poza zaletami mogą też mieć wady, jak wysoki koszt energetyczny, niska skuteczność czy niebezpieczeństwo wtórnego zanieczyszczenia wody [15]. Konieczny jest dalszy rozwój metod, np. wprowadzanie modyfikacji używanych materiałów [16] lub łączenie różnych technik [17], w celu zwiększenia efektywności usuwania szkodliwych substancji czy obniżenia kosztów.

Celem pracy jest przegląd metod pozwalających na usuwanie z wody zanieczyszczeń pochodzących z PVC oraz porównanie ich skuteczności. Techniki zostały również scharakteryzowane pod względem zalet i potencjalnych problemów, które mogą się pojawić przy ich zastosowaniu. Wskazane zostały możliwości poprawy skuteczności poszczególnych technik, takie jak modyfikacje czy jednoczesne stosowanie kilku metod. Zwrócono także uwagę na zagrożenia środowiskowe oraz zdrowotne związane z wykorzystaniem substancji dodawanych do polichlorku winylu.

2. Dodatki do PVC

Polichlorek winylu jest tworzywem sztucznym powszechnie spotykanym. Jest szeroko stosowany w budownictwie, przemyśle tekstylnym, motoryzacyjnym, medycznym, w produkcji kabli, opakowań, folii i wielu innych przedmiotów używanych w życiu codziennym. Podczas jego produkcji, polegającej na polimeryza-

cji monomeru chloru winylu, dodaje się do niego różne substancje, mające poprawić jego właściwości. Raport przygotowany na zlecenie Komisji Europejskiej wyszczególnił około 470 takich substancji, określając 63 z nich jako „dodatki priorytetowe”, ze względu na zagrożenia zdrowotne i środowiskowe płynące z ich stosowania [4].

Polichlorek winylu charakteryzuje się ogólnie dobrą wytrzymałością, jednak niektóre czynniki, takie jak światło UV, podwyższona temperatura czy promieniowanie, mogą prowadzić do jego degradacji. Potrzeba zwiększenia jego odporności na warunki zewnętrzne skutkuje koniecznością użycia stabilizatorów [18]. Związki cynoorganiczne są dużą grupą foto-stabilizatorów [19]. Ich dodatek zmniejsza podatność PVC na fotodegradację [20]. Pełnią one również rolę w zwiększaniu jego termostabilności [21]. Inne przykłady termostabilizatorów to fosforyn diizodecylofenyloxy czy fosforyn izodecylofenyloxy [4].

Obecność dodatków takich jak palne plastyfikatory, zwiększa zagrożenie pożarowe związane ze stosowaniem PVC. Ważną grupę dodatków stanowią więc organiczne i nieorganiczne środki opóźniające palność (flame retardants; FR). Najszerzej stosowanym spośród tych związków jest Sb_2O_3 [22]. Inne substancje z tej grupy to tlenki i sole metali, borany, węglany, związki metaloorganiczne, montmorylonit, czy substancje oparte na węglu, takie jak grafen lub grafit [23].

Polichlorek winylu odznacza się dużą twardością, jego struktura może zostać uelastyczniona poprzez dodatek wspomnianych wcześniej plastyfikatorów. Plastyfikowany PVC jest wykorzystywany do produkcji wykładzin podłogowych, kabli, węży, zabawek, a także urządzeń medycznych [24]. Zależnie od rodzaju tworzywa, elastyczny PVC może się składać nawet w 70% z plastyfikatorów [23]. Około 70% wszystkich produkowanych plastyfikatorów stanowią estry kwasu ftalowego (phthalic acid esters; PAEs) [25]. Należą do nich m.in. ftalan dibutylo (DBP), ftalan di-izobutylo (DiBP), ftalan benzylu-butylu (BBP), ftalan di-izononylo (DINP), ftalan di-izodecylo (DIDP), czy najczęściej stosowany ftalan di-2-etyloheksylo (DEHP). Innymi plastyfikatorami, wykorzystywanymi w PVC, które mogą stanowić potencjalne zagrożenie, są estry kwasu trimelitowego oraz benzoesany [4].

3. Wpływ na organizmy

Związki cynoorganiczne są wykrywane w rzekach, jeziorach [26], morskiej florze i faunie [27], również w żywności [28]. Dilaurynian dibutylocylo, wykorzystywany jako jeden ze stabilizatorów termicznych PVC [4], wywołuje stres oksydacyjny, spowalniając proliferację komórek. Hamuje on również ekspresję białek odpowiedzialnych za utrzymanie zdrowia ludzkiego mózgu [29]. Prowadzi do uszkodzeń DNA, wpływa na aktywność enzymatyczną i może prowadzić do degradacji mózgu (badania przeprowadzone na szczurach) [11]. Działanie neurotoksyczne dla gryzoni wykazuje również fosforyn trifenylu [30].

Środki opóźniające palność nie są chemicznie związane ze strukturą PVC, w związku z czym mogą łatwo wymyć się z tworzywa. Duży wpływ ma temperatura: wraz ze wzrastającą temperaturą (20–80°C) wzrasta uwalnianie FR. Bromowane FR mogą wpływać na tarczycę, układ nerwowy oraz rozrodczy zwierząt [31]. Organofosforanowe środki opóźniające palność, takie

jak fosforan trifenylu, są wykrywane w kurzu, wraz z którym mogą się przedostawać do organizmu człowieka drogą oddechową [32]. U ludzi mogą wywoływać astmę oraz alergie [33]. Mogą być również szkodliwe dla organizmów wodnych [6]. Szeroko stosowany Sb2O3 jest klasyfikowany jako potencjalnie rakotwórczy dla ludzi. U zwierząt może wywoływać aberracje chromosomowe [34].

Plastyfikatory, również niewbudowane w strukturę PVC, są wykrywane w rzekach [35], wodzie morskiej [36], wodzie przeznaczonej do spożycia [8], ściekach, wysypiskach śmieci [37], glebie [38] oraz żywności [39]. Ich wymywanie do środowiska może zależeć od wielu czynników, takich jak pH, temperatura, ciśnienie [40], zasolenie czy warunki przepływu wody [41]. Ftalany, najczęściej stosowane w charakterze plastyfikatorów, są szkodliwe dla roślin, mogą powodować stres oksydacyjny [42]. U bakterii mogą wpływać na morfologię, płynność błony komórkowej oraz na zdolność tworzenia biofilmów [43]. Są toksyczne dla zwierząt, mogą zaburzać działanie układu hormonalnego (endocrine disruptors) oraz powodować zaburzenia rozwojowe i śmierć u ryb [44]. Najczęściej stosowany plastyfikator (DEHP) może zaburzać rytm dobowy i ekspresję genów u nicieni glebowych [45]. U owadów może zaburzać funkcje motoryczne oraz widzenie [46]. Ftalany mogą powodować u ssaków zaburzenia pracy nerek [47] oraz hamować aktywność neuronów [48]. Dla ludzi niektóre z nich są potencjalnie rakotwórcze [49]. Mogą wykazywać działanie kardiotoxyczne [50], oraz przyspieszać starzenie [51]. Szczególne obawy może budzić fakt, że ftalany są stosowane w urządzeniach i przyrządach medycznych [52]. Inne używane w PVC plastyfikatory, takie jak estry kwasu trimeelitowego czy benzoesany, mogą wykazywać działanie reprotoksykcyjne [4]. Trimelityny łatwo wypłukują się z PVC i przenikają do wód, gdzie mogą ulegać bioakumulacji i wykazywać działanie toksyczne i zaburzające funkcjonowanie układu hormonalnego [53]. Przykłady obecności w środowisku szkodliwych związków dodawanych do PVC przedstawiono w tabeli 1.

W Unii Europejskiej regulacje ograniczają ilości dodawanych niektórych ftalanów, takich jak DEHP, DBP czy BBP. Są one całkowicie zakazane w kosmetykach, natomiast w zabawkach, opakowaniach na żywność oraz urządzeniach medycznych ich zawartość nie może przekraczać 0,1% masy tworzywa [54]. Do takich samych poziomów w Stanach Zjednoczonych ograniczone jest użycie DCHP (ftalan dicykloheksylu), DBP czy BBP w zabawkach i produktach przeznaczonych dla dzieci, natomiast Clean Water Act ogranicza maksymalną obecność DEHP w wodzie przeznaczonej do spożycia do 0,006 mg/L [55]. W Unii Europejskiej zawartość ołowiu (w związkach wykorzystywanych jako stabilizatory) w PVC nie może przekraczać 0,1% masy tworzywa [56]. Podobne limity (0% lub maksymalnie 0,1%, zależnie od związku) są ustalone w UE dla polibromowanych difenyloteterów, wykorzystywanych jako środki opóźniające palność. Jednocześnie, wg badań przeprowadzonych przez Olisah i in. [57], w badanych zabawkach zawartość przekraczała maksymalny dopuszczalny poziom tych związków. Regulacje prawne nie gwarantują całkowitej eliminacji szkodliwych substancji z polichloru winylu oraz ze środowiska.

Tabela 1. Przykładowe substancje dodawane do polichloru winylu i ich stężenia wykryte w wodzie

Table 1. Examples of substances added to polyvinyl chloride and their concentrations detected in water

Nazwa	Nr CAS	Stężenie wykryte w wodzie	Źródło
Związki dibutylocyny	–	39,2 ng/L	[58]
UV-326	3896-11-5	16 ng/L	[26]
UV-328	25973-55-1	583 ng/L	[26]
Fosforan tritolilu	1330-78-5	0,494 ng/L	[6]
Fosforan tris(2-etyloheksylu)	78-42-2	0,295 ng/L	[6]
Fosforan triksylilu	25155-23-1	1,547 ng/L	[6]
Fosforan krezylu difenylu	26444-49-5	0,980 ng/L	[6]
Ftalan di(2-etyloheksylu)	117-81-7	910 ng/L	[59]
Ftalan dibutyłu	84-74-2	770 ng/L	[59]
Ftalan benzylu butylu	85-68-7	21,3 ng/L	[60]
Ftalan di-n-oktylu	117-84-0	14,4 ng/L	[60]

4. Wybrane metody usuwania zanieczyszczeń pochodzących z PVC w środowisku wodnym

Ze względu na możliwość przedostawania się dodatków stosowanych w PVC do wód, w tym do ujęć wody, oraz negatywnego wpływu na środowisko i zdrowie człowieka, pojawia się konieczność opracowania skutecznych metod usuwania stabilizatorów, środków opóźniających palność i plastyfikatorów ze środowiska wodnego. Istnieje wiele technik umożliwiających usuwanie zanieczyszczeń, takich jak adsorpcja, koagulacja, filtracja, metody wykorzystujące zaawansowane procesy utleniania czy procesy biologiczne.

4.1. Adsorpcja

Adsorpcja jest metodą wykorzystywaną do usuwania zanieczyszczeń z wody. Polega na umieszczeniu w wodzie adsorbentu, który ze względu na swoje właściwości, takie jak powierzchnia czy pH, może adsorbować różne związki chemiczne [61]. Wiele materiałów może pełnić rolę adsorbentów, np. osad czynny, biopolimery [62], materiały węglowe, takie jak węgiel aktywny [63] czy biowęgiel [64], chitozan [65], a także materiały odpadowe, np. kurze pióra [66]. Bo-uhamidi i in. [67] osiągnęła adsorpcję ftalanu dibutyłu na aktywowanym węglu na poziomie 977 mg/g. Ji i in. [16] wykorzystał biowęgiel z bambusa do adsorpcji ftalanu dietylu (DEP) i osiągnęła adsorpcję na poziomie 206,8 mg/g. Ten sam biowęgiel poddał modyfikacji mocznikiem, co zwiększyło adsorpcję do 823,46 mg/g. W tym badaniu potwierdzono również możliwość płukania adsorbentu etanolem i ponownego użycia. Hoch i in. [68] uzyskał adsorpcję związków dibutylocyny na osadzie bogatym w montmorylonit na poziomie 83%, na osadzie bogatym w kaolinit 67%, a na osadzie zawierającym mieszanekę kaolinitu oraz illitu 53%. Są to wyniki uzyskane w roztworze o pH 6, w którym (w sprawdzanym zakresie pH 4–8) adsorpcja była najwyższa. Wang i in. [69] wykorzystał bazujące na NiFe₂O₄ magnetyczne kowalencyjne sieci organiczne do adsorpcji środków opóźniających palność (91,2% dla tetrabromobisfenolu A).

4.2. Filtracja membranowa

Filtracja membranowa jest metodą wykorzystującą porowate membrany. Gradient ciśnienia po obu stronach membrany skutkuje przepływem cieczy przez pory membrany, które zatrzymują zanieczyszczenia. Wyróżnia się kilka rodzajów tego procesu, takich jak mikrofiltracja, ultrafiltracja, nanofiltracja, odwrócona osmoza czy wymuszona osmoza [70]. Dostępnych jest wiele filtrów, które można poddawać modyfikacjom w celu poprawy ich zdolności filtrujących [71]. Metoda ta może zostać użyta do usuwania plastyfikatorów. W badaniach przeprowadzonych przez Moraczewska-Majkut i in. [72] rodzaj zastosowanej membrany miał znaczący wpływ na filtrację zanieczyszczeń, m.in. ftalanu dimetylu (DMP) (od 13,8% na membranie V5 do ponad 60% na membranie NF270). Yang i in. [17] uzyskał efektywność usuwania ftalanu di-n-butylu (DnBP) oraz DEHP na poziomie 99%, wykorzystując membranę z kompozytu ceramicznego zawierającego grafen, w połączeniu z elektrokoagulacją i elektrofiltracją. Nanofiltracja, zwłaszcza w połączeniu z ultrafiltracją może być wysoce skuteczna w usuwaniu środków opóźniających palność, np. fosforanu trioktylu (usuwanie na poziomie prawie 100%), w porównaniu do tradycyjnych metod oczyszczania wody, obejmujących flokulację, filtrację piaskową i chlorowanie (usuwanie na poziomie 60%) [73]. Wadą tej metody jest możliwość zanieczyszczenia membrany, nawet nieodwracalnego, jeśli dojdzie do zatkania porów. Na ten proces wpływają czynniki, takie jak pH, siła jonowa, temperatura czy właściwości membrany [74].

4.3. Koagulacja

Koagulacja polega na fizyko-chemicznej destabilizacji oddziaływań elektrycznych pomiędzy cząstkami koloidu, co skutkuje łączeniem się ich w większe aglomeraty. Wykorzystuje się do tego koagulanty, takie jak sole metali (np. glinu czy żelaza), nieorganiczne i organiczne polimery oraz biokoagulanty, bazujące na chitozanie lub taninach. Elektrokoagulacja, technika wykorzystująca metale rozpuszczone w wodzie w charakterze anody, może być skuteczna w usuwaniu związków takich jak pestycydy czy barwniki [75]. Wang i Liu [76] przy zastosowaniu elektrokoagulacji osiągnęli 75% degradacji DBP w czasie 15 minut, z zapotrzebowaniem energetycznym $2,5 \text{ kWh m}^{-3}$. Zhao i in. [77] uzyskał usuwanie DEHP na poziomie 78,93% przy zastosowaniu gumy guar jako koagulantu. Zoumpouli i in. [78] wskazał na wydajność usuwania trzech polibromowanych środków opóźniających palność na poziomie 60–75% przy użyciu glinu, lub 50–88% przy użyciu żelaza jako koagulantów. Wpływ na wydajność tego procesu miał rodzaj materii organicznej rozpuszczonej w wodzie. Obecność kwasu humusowego zwiększała, a kwasu cytrynowego obniżała koagulację zanieczyszczeń.

4.4. Oczyszczanie biologiczne

Metoda oczyszczania biologicznego obejmuje wykorzystanie mikroorganizmów do metabolizowania zanieczyszczeń poprzez procesy tlenowe i beztlenowe [79]. Przykładami tych procesów są fermentacja, procesy wykorzystujące osad czynny, bioreaktory, w tym reaktory membranowe [80]. Można ją łączyć z innymi

technikami [81]. Możliwe jest wykorzystanie tej metody do usuwania z wody dodatków do PVC, dzięki zastosowaniu bakterii rozkładających ftalany, takich jak *Rhodococcus pyridinivorans* [82]. Według Kamaraj i in. [83] degradacja DEHP przez bakterie *Rhodococcus* może być niższa w wyższym zasoleniu (10–50 g/L). *Pigmentiphaga sp. upd102* potencjalnie może całkowicie mineralizować ftalan dietylu [84]. Bakterie z rodzajów *Rhodococcus*, *Nitrospira* i *Phaeodactylibacter* są w stanie rozkładać estry organofosforanowe [85]. Mikroskopijny grzyb *Cochliobolus lunatus* jest zdolny do degradacji stabilizatorów oktylocynowych [86].

4.5. Fitoremediacja

Fitoremediacja polega na wykorzystaniu roślin (ok. 500 gatunków) do oczyszczania m.in. wody [87]. Rośliny są zdolne do sorpcji zanieczyszczeń organicznych i nieorganicznych z wody przez korzenie. Możliwe są modyfikacje genetyczne roślin poprawiające skuteczność usuwania zanieczyszczeń [88]. Fitoremediacja może zostać użyta do usuwania ftalanów. Liao i in. [89] użył *Lactuca sativa L. var. longifolia*, co pozwoliło na skrócenie okresu półtrwania DBP do 2,7 dnia. Według Wang i in. [90] skuteczność usuwania związków organofosforanowych wynosi 57,9–63,8% po 10 dniach z użyciem *Triticum aestivum L.* w uprawie hydroponicznej. Zdolność do usuwania stabilizatorów, taki jak 2-(3-tert-butyl-2-hydroksy-5-metylofenylo)-5-chlorobenzotriazol (UV-326), wykazują *Lemna minor*, *Spirodela polyrhiza* i *Azolla caroliniana* [91].

4.6. Zaawansowane procesy utleniania

Zaawansowane procesy utleniania pozwalają na efektywne usuwanie zanieczyszczeń, które nie są biodegradowalne [92]. Umożliwiają degradację związków organicznych znajdujących się w wodzie, jednak ich efektywność może być niższa niż innych technik, np. odwróconej osmozy [93]. Metoda ta polega na generowaniu reaktywnych form tlenu, które następnie reagują z cząsteczkami zanieczyszczeń, powodując ich rozpad. Istnieją różne rodzaje zaawansowanych procesów utleniania, np. fotokataliza, proces Fentona, ozonowanie czy sonoliza (hydroliza ultradźwiękowa) [94].

4.6.1. Fotokataliza

Mechanizm działania fotokatalizy polega na oświetleniu fotokatalizatora światłem o odpowiedniej energii (długość fali i intensywność), powodującym wzbudzenie elektronów. Na skutek tego następują reakcje utleniania i redukcji, w wyniku których powstają reaktywne formy tlenu, wykorzystywane do rozkładania zanieczyszczeń [95]. Często wykorzystywanym fotokatalizatorem jest TiO_2 . Można go poddać modyfikacjom poprawiającym jego właściwości [96]. Dostępne są też inne fotokatalizatory [97], a metodę można łączyć z innymi technikami, jak metody wykorzystujące procesy fototermałne [98]. Wykorzystanie fotokatalizy powiązanej z procesami biologicznymi może być skuteczne przy usuwaniu plastyfikatorów, takich jak DEHP, DBP i DMP. System fotobiologiczny zastosowany przez Chung i Chen [99], łączący fotokatalizę z wykorzystaniem bakterii *Pseudomonas*

putida i mikroalg Chlorella, osiągnął mineralizację na poziomie 99,2% dla DEHP i DBP w środowiskowych próbkach wody ściekowej. Fotokataliza może być skuteczna przy usuwaniu środków opóźniających palność. Ye i in. [100] uzyskał 99% degradacji fosforanu tris(2-chloroetylu) (TCEP) w czasie 10 minut, jednak obecność kwasu humusowego oraz jonów Cl⁻ i NO₃⁻ obniżała efektywność procesu.

Półprzewodniki stosowane w tej technice jako katalizatory mogą z czasem ulegać fotokorozji, prowadzącej do zmian strukturalnych i morfologicznych. Zanieczyszczenia mogą adsorbować do powierzchni katalizatora. Te procesy skutkują spadkiem efektywności fotokatalizy i koniecznością regeneracji, czasami wiążącej się z użyciem zaawansowanych procedur [101].

4.6.2. Proces Fentona

Proces Fentona polega na rozkładzie H₂O₂ przez jony Fe²⁺, z wytworzeniem wolnych rodników (np. rodnik hydroksylowy). Reakcja Fentona może być wspomagana przez światło UV (foto-Fenton), elektrochemicznie (elektro-Fenton), ultradźwięki (sono-Fenton) lub połączenia tych czynników (np. sono-elektro-Fenton, foto-elektro-Fenton) [102]. Zastosowanie takich modyfikacji może zmniejszyć ilość potrzebnych reagentów oraz umożliwić pracę w szerszym zakresie pH. Możliwe jest wykorzystanie tej metody w celu remediacji wody [103]. Reakcja Fentona może być skuteczna przy usuwaniu plastyfikatorów, takich jak ftalan di-izobutyłu (87% degradacji w 30 minut) [104]. Foto-Fenton może służyć do usuwania środków opóźniających palność, np. fosforanu tris (2-chloroetylu), przy 93% skuteczności w czasie 90 minut [105]. Liu i in. [106] osiągnął degradację tetrabromobisfenolu A na poziomie 98,9% przy zastosowaniu filtra zawierającego atomy Fe.

4.6.3. Ozonowanie

Ozonowanie wykorzystuje ozon (O₃) jako czynnik utleniający wykorzystywany do dezynfekcji i degradacji związków organicznych [107]. Ozonowanie jest procesem wymagającym wysokich nakładów energetycznych, co wymaga modyfikowania metody. Jednym ze sposobów modyfikacji jest zastosowanie katalizatora (np. tlenki metali, materiały węglowe) [108]. Ozonowanie może zostać zastosowane do usuwania plastyfikatorów. Według Zhang i in. [109] metoda ta pozwala na degradację 99% DBP w czasie 80 minut. Ozonowanie może być skuteczne przy usuwaniu środków opóźniających palność, jak fosforan triizobutyłu (degradacja na poziomie 80%) [110]. Według Lovato i in. [111] rozkład BBP przy użyciu ozonowania jest wyższy w pH 10 (91%), niż w pH 4 (65%) i 7 (83%).

4.6.4. Hydroliza ultradźwiękowa

W hydrolizie ultradźwiękowej rodniki, wraz z wysoką temperaturą i ciśnieniem, są wytwarzane w wyniku pęknięcia pęcherzyków gazu, powstałych w wodzie na skutek działania ultradźwięków [112]. Łączenie tej metody z innymi, np. z ozonowaniem, może podnieść efektywność usuwania zanieczyszczeń [113]. Wadą so-

nolizy może być wysoki koszt energetyczny procesu [114], jednak może być ona wykorzystana do skutecznego usuwania substancji dodawanych do PVC. Według Psillakis i in. [115] możliwa jest degradacja DnBP, BBP, DEHP oraz DnOP (ftalan di-n-oktylu) w trakcie 30–60 minut hydrolizy ultradźwiękowej. W badaniach przeprowadzonych przez M. i in. [116] sonoliza pozwoliła na obniżenie okresu półtrwania fosforanu tris (2-chloroetylu) (TCEP) do 1 godziny.

4.7. Fotoliza

Fotoliza jest procesem degradacji związków chemicznych pod wpływem światła. Może zachodzić w sposób bezpośredni (rozkład pod wpływem działania światła widzialnego lub UV) lub pośredni (rozkład pod wpływem rodników wytworzonych z użyciem światła) [117]. Według badań przeprowadzonych przez Lovato i in. [111], w usuwaniu BBP bezpośrednia fotoliza jest mniej efektywna niż ozonowanie, jednak może podnosić efektywność ozonowania (okres półtrwania BBP wynosił 2,04–0,45 minuty, zależnie od stężenia ozonu). Chang Su i in. [118] zbadał wpływ światła na odbarwienie stabilizatora cynoorganicznego (merkaptid metylocyny, MTM). Odbarwienie nastąpiło jedynie pod wpływem światła w zakresie UV i było procesem odwracalnym. Według Chen i in. [119] promieniowanie UV wykazuje wyższą fotodegradację stabilizatorów cynoorganicznych niż światło widzialne. Obecność materii organicznej w wodzie może ograniczać proces fotolizy zanieczyszczeń, obniżając jej efektywność lub wpływając na powstawanie różnych form produktów rozkładu [120]. Produkty te mogą być toksyczne [121].

5. Wnioski

Substancje dodawane do PVC do poprawy jego właściwości mogą się wymywać ze struktury polimeru i przedostawać do środowiska wodnego. Wiele z tych związków, wykorzystywanych jako stabilizatory, plastyfikatory i środki opóźniające palność, wykazują działanie toksyczne dla roślin, zwierząt oraz ludzi.

Istnieje wiele metod, które mogą znaleźć zastosowanie przy usuwaniu dodatków do PVC ze środowiska wodnego, jednak ich skuteczność jest zróżnicowana. Techniki łatwe do zastosowania w laboratorium, mogą okazać się nieopłacalne do zaimplementowania w większej skali, ze względu na konieczność użycia skomplikowanych materiałów lub wysoki koszt energetyczny danego procesu. Istotne są zarówno obecność w wodzie innych zanieczyszczeń, jak i wpływ czynników środowiskowych, jak pH czy temperatura, które mogą obniżyć wydajność usuwania tych substancji. Zalety i wady poszczególnych metod przedstawiono w tabeli 2.

Ograniczenia poszczególnych metod mogą być minimalizowane przez wprowadzenie modyfikacji lub łączenie z innymi technikami, co może prowadzić do zwiększenia ich wydajności. Konieczne są więc dalsze badania nad rozwojem tych metod, w celu optymalizacji procesu usuwania zanieczyszczeń ze środowiska wodnego.

Tabela 2. Porównanie zalet i wad wybranych metod usuwania dodatków do PVC ze środowiska wodnego**Table 2.** A comparison of the advantages and disadvantages of selected methods for removing PVC additives from water

Metoda	Zalety	Wady
Adsorpcja	niski koszt, możliwość wykorzystania materiałów odpadowych, możliwość modyfikacji adsorbentu, możliwość regeneracji i ponownego użycia adsorbentu	zależność od czynników środowiskowych (temperatura, pH), możliwy wpływ obecności innych zanieczyszczeń na efektywność procesu
Filtracja membranowa	wysoka skuteczność, możliwość regeneracji membran	możliwość zanieczyszczenia membrany (nawet nieodwracalnego), wpływ czynników środowiskowych (pH, siła jonowa, temperatura)
Koagulacja	dla niektórych koagulantów (np. chitozan): nietoksyczność, możliwość biodegradacji koagulantów, niski koszt	dla niektórych koagulantów (np. metale rozpuszczone w wodzie przy elektrokoagulacji): zanieczyszczenie wody metalami lub polimerami, wpływ koagulantów na pH oczyszczanej wody, wysoki koszt finansowy i energetyczny, możliwy wpływ obecności innych zanieczyszczeń na efektywność procesu
Oczyszczanie biologiczne	możliwość całkowitej mineralizacji zanieczyszczeń przez niektóre szczepy bakterii	wrażliwość procesów biologicznych na czynniki zewnętrzne (np. zasolenie, obecność tlenu, temperatura)
Fitoremediacja	niski koszt finansowy, metoda nie wymaga wysokich nakładów pracy, możliwość modyfikacji genetycznych poprawiających skuteczność usuwania zanieczyszczeń	metoda może być mało efektywna
Fotokataliza	nietoksyczność, niski koszt finansowy, stabilność procesu, możliwość regeneracji fotokatalizatorów	możliwość fotokorozji katalizatorów, możliwość adsorpcji zanieczyszczeń do powierzchni katalizatora, obniżającej skuteczność procesu, regeneracja może się wiązać z użyciem skomplikowanych procedur
Proces Fentona	wysoka skuteczność, możliwość wspomagania metody światłem UV, ultradźwiękami, elektrochemicznie	–
Ozonowanie	wysoka skuteczność	wysoki koszt energetyczny, zależność od czynników takich jak pH
Hydroliza ultradźwiękowa	wysoka skuteczność	wysoki koszt energetyczny
Fotoliza	możliwość łączenia z innymi metodami w celu podniesienia ich efektywności	niska skuteczność, efektywność może być zależna od obecności innych zanieczyszczeń

6. Literatura

- [1] Lewandowski, K., & Skórczewska, K. (2022). A brief review of poly (vinyl chloride)(PVC) recycling. *Polymers*, 14(15), 3035. <https://doi.org/10.3390/polym14153035>
- [2] Braun, D. (2004). Poly (vinyl chloride) on the way from the 19th century to the 21st century. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 42(3), 578-586. <https://doi.org/10.1002/pola.10906>
- [3] Kudzin, M. H., Piwowarska, D., Festinger, N., & Chruściel, J. J. (2023). Risks associated with the presence of polyvinyl chloride in the environment and methods for its disposal and utilization. *Materials*, 17(1), 173. <https://doi.org/10.3390/ma17010173>
- [4] European Chemicals Agency (ECHA). (2023). *Investigation report on PVC and PVC additives*. <https://www.actu-environment.com/media/pdf/news-43052-etude-echa-pvc-additifs.pdf>
- [5] Kumari, A., & Kaur, R. (2022). Uptake of a plasticizer (di-n-butyl phthalate) impacts the biochemical and physiological responses of barley. *PeerJ*, 10, e12859. <https://doi.org/10.7717/peerj.12859>
- [6] Hong, W.-J., Zhang, X.-L., Liu, H., Jiang, J.-M., Wang, X., Li, M., Guo, L.-H., Ye, C., & Wu, H.-G. (2024). Organophosphorus flame retardants in the Qiantang River of China: occurrence, source and ecological risk assessment. *Environmental Geochemistry and Health*, 46(10), 379. <https://doi.org/10.1007/s10653-024-02172-3>
- [7] Haydous, F., Nehmeh, B., Rebehmed, J., Al-Alam, J., Saab, C., Sabbagh, S., Hamieh, A., Yassin, A., Wazne, M., & Akoury, E. (2025). Unraveling the levels of emerging contaminants along the eastern Mediterranean Sea. *Scientific Reports*, 15(1), 4401. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-89027-8>
- [8] Kong, Y., Shen, J., Chen, Z., Kang, J., Li, T., Wu, X., Kong, X., & Fan, L. (2017). Profiles and risk assessment of phthalate acid esters (PAEs) in drinking water sources and treatment plants, East China. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(30), 23646-23657. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9783-x>
- [9] Adam, N., Naulé, L., Grange-Messent, V., Desroziers, E., Parmentier, C., Hardin-Pouzet, H., & Mhaouty-Kodja, S. (2025, June). Plasticizers, brain & behavior. In *Annales d'Endocrinologie* (Vol. 86, No. 3, p. 101779). Elsevier Masson. <https://doi.org/10.1016/j.ando.2025.101779>
- [10] Yang, J., Luo, M., Wang, H., & Huang, J. (2025). Phthalates unleashed: decoding ovarian carcinogenesis through multi-omics networks, single-cell insights, and molecular docking. *Journal of ovarian research*, 18(1), 131. <https://doi.org/10.1186/s13048-025-01710-6>
- [11] Jin, M., Song, P., Li, N., Li, X., & Chen, J. (2012). A plastic stabilizer dibutyltin dilaurate induces subchronic neurotoxicity in rats. *Neural Regeneration Research*, 7(28), 2213-2220. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-5374.2012.028.007>
- [12] Chaudhary, H. D., Bhatt, U., & Soni, V. (2025). Chlorophyll Fluorescence and Biochemical Biomarkers Reveal Plasticizer Di-n-Butyl Phthalate-Induced Stress in *Azolla pinnata*. *Plants*, 14(23), 3629. <https://doi.org/10.3390/plants14233629>

- [13] Dettoto, C., Maccantelli, A., Barbieri, M. V., Bains, M., Fernández-Arribas, J., Panti, C., Giani, D., Galli, M., Eljarrat, E., & Fossi, M. C. (2024). Plasticizers levels in four fish species from the Ligurian Sea and Central Adriatic Sea (Mediterranean Sea) and potential risk for human consumption. *The Science of the Total Environment*, 954, 176442. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176442>
- [14] Bukhari, I., Haq, F., Kiran, M., Kundi, R., & Kiran, A. (2025). Emerging contaminants in water systems: detection, environmental impacts, and sustainable removal solutions. *Water Air & Soil Pollution*, 236(8). <https://doi.org/10.1007/s11270-025-08206-5>
- [15] Miao, M., Lu, Q., Wang, X., Zhang, Y., Wong, N. H., Sunarso, J., Xiao, C., & Li, N. (2023). Removal of micro-organic contaminants from wastewater: A critical review of treatment technology. *Next Materials*, 1(2), 100016. <https://doi.org/10.1016/j.nxmte.2023.100016>
- [16] Ji, G., Hou, Y., Zhang, Y., Han, Z., Sun, Q., Ji, R., Li, Z., Han, J., Cheng, H., Song, Y., & Xue, J. (2024). Engineered biochar with ultrahigh surface areas derived from postpyrolysis with urea for efficient removal of plasticizer. *Fuel*, 369, 131702. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131702>
- [17] Yang, G. C., Chen, Y., Yang, H., & Yen, C. (2016). Performance and mechanisms for the removal of phthalates and pharmaceuticals from aqueous solution by graphene-containing ceramic composite tubular membrane coupled with the simultaneous electrocoagulation and electrofiltration process. *Chemosphere*, 155, 274–282. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.04.060>
- [18] Arraq, R., Hadi, A., Kadhom, M., Mohammed, S., Bufarosh, M., Ahmed, D. S., Hashim, H., Husain, A., Ahmed, A., Al-Amiery, A., Rashad, A., & Yousif, E. (2023). Enhancing photostability of poly(vinyl chloride) through additives: diorganotin (iv)-tyrosine complexes design. *Journal of Polymer Research*, 30(10). <https://doi.org/10.1007/s10965-023-03748-w>
- [19] Khalid, S., Al-Rawi, S. S., Saman, S. S., Yaqoob, M., Iqbal, M. A., Asad, M., Haider, M. T., Majeed, A., & Nadeem, H. (2025). The role of tin-based complexes in enhancing PVC photostability and their environmental impacts. *Next Materials*, 9, 101014. <https://doi.org/10.1016/j.nxmte.2025.101014>
- [20] Ghazi, D., El-Hiti, G., Yousif, E., Ahmed, D., & Alotaibi, M. (2018). The Effect of Ultraviolet Irradiation on the Physicochemical Properties of Poly(vinyl Chloride) Films Containing Organotin(IV) Complexes as Photostabilizers. *Molecules*, 23(2), 254. <https://doi.org/10.3390/molecules23020254>
- [21] Ma, L., Lu, Y., Chen, Y., Lu, Y., & Yuan, G. (2022). Dehydrochlorination study of plasticized poly(vinyl chloride) containing modified titanium dioxide, cerium stearate, organotin and β -diketone complex after long-term storage. *Materials Research Express*, 9(2), 025305. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ac4f87>
- [22] Wang, B., Yu, X., Yu, F., Song, Z., Cao, H., Han, D., Song, L., & Hu, Y. (2025). Improved Smoke Suppression and Toxicity Reduction of Poly(vinyl chloride) Materials Enabled by Rare Earth-based Y₂Sn₂O₇. *Chinese Journal of Polymer Science*, 43(12), 2241–2251. <https://doi.org/10.1007/s10118-025-3449-9>
- [23] Pan, Y., Yuan, Y., Wang, D., & Yang, R. (2020). An Overview of the Flame Retardants for Poly(vinyl chloride): Recent States and Perspective†. *Chinese Journal of Chemistry*, 38(12), 1870–1896. <https://doi.org/10.1002/cjoc.202000375>
- [24] Lee, Y., Lim, Y., Kang, S., & Kim, S. (2025). Migration of phthalate and non-phthalate plasticizers from polyvinyl chloride (PVC) materials. *The Science of the Total Environment*, 1002, 180559. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.180559>
- [25] Peng, C., Tang, J., Yu, X., Zhou, X., Wang, M., Zhang, Y., Zhou, H., Huang, S., Wen, Q., Chen, S., Xiang, W., Zhang, Q., & Cai, T. (2025). Biodegradation of various phthalic acid esters at high concentrations by *Gordonia alkanivorans* GH-1 and its degradation mechanism. *Environmental Technology & Innovation*, 38, 104066. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2025.104066>
- [26] Kameda, Y., Kimura, K., & Miyazaki, M. (2011). Occurrence and profiles of organic sun-blocking agents in surface waters and sediments in Japanese rivers and lakes. *Environmental Pollution*, 159(6), 1570–1576. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.02.055>
- [27] Mukhtar, A., Zulkifli, S. Z., Mohamat-Yusuff, F., Harino, H., & Ismail, A. (2020). Distribution of biocides in selected marine organisms from South of Johor, Malaysia. *Regional Studies in Marine Science*, 38, 101384. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2020.101384>
- [28] Li, Y., Huang, X., Ge, N., Zhang, J., Cao, Y., & Cui, Z. (2023). Occurrence of organotin compounds in food: increasing challenge of phenyltin compounds. *Journal of Environmental Science and Health Part B*, 59(1), 9–14. <https://doi.org/10.1080/03601234.2023.2278385>
- [29] Hao, M., Shi, N., Zhao, Y., & Chen, J. (2025). Investigating the potential molecular mechanisms of dibutyltin dilaurate induced brain injury: a network toxicology and molecular docking approach. *Environmental Pollution*, 381, 126642. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.126642>
- [30] Veronesi, B. (1986). Biochemical and neuropathological assessment of triphenyl phosphite in rats. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 83(2), 203–210. [https://doi.org/10.1016/0041-008x\(86\)90297-8](https://doi.org/10.1016/0041-008x(86)90297-8)
- [31] Sun, J., Chen, Q., Han, Y., Zhou, H., & Zhang, A. (2018). Emissions of selected brominated flame retardants from consumer materials: the effects of content, temperature, and timescale. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(24), 24201–24209. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2494-0>
- [32] Bastiaensen, M., Bamai, Y. A., Araki, A., Van Den Eede, N., Kawai, T., Tsuboi, T., Kishi, R., & Covaci, A. (2019). Biomonitoring of organophosphate flame retardants and plasticizers in children: Associations with house dust and housing characteristics in Japan. *Environmental Research*, 172, 543–551. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.02.045>
- [33] Araki, A., Saito, I., Kanazawa, A., Morimoto, K., Nakayama, K., Shibata, E., Tanaka, M., Takigawa, T., Yoshimura, T., Chikara, H., Saijo, Y., & Kishi, R. (2013). Phosphorus flame retardants in indoor dust and their relation to asthma and allergies of inhabitants. *Indoor Air*, 24(1), 3–15. <https://doi.org/10.1111/ina.12054>
- [34] Schildroth, S., Osborne, G., Smith, A. R., Yip, C., Collins, C., Smith, M. T., Sandy, M. S., & Zhang, L. (2020). Occupational exposure to antimony trioxide: a risk assessment. *Occupational and Environmental Medicine*, 78(6), 413–

418. <https://doi.org/10.1136/oemed-2020-106980>
- [35] Selvaraj, K. K., Sundaramoorthy, G., Ravichandran, P. K., Girijan, G. K., Sampath, S., & Ramaswamy, B. R. (2014). Phthalate esters in water and sediments of the Kaveri River, India: environmental levels and ecotoxicological evaluations. *Environmental Geochemistry and Health*, 37(1), 83–96. <https://doi.org/10.1007/s10653-014-9632-5>
- [36] Zhang, Q., Song, J., Li, X., Peng, Q., Yuan, H., Li, N., Duan, L., & Ma, J. (2019). Concentrations and distribution of phthalate esters in the seamount area of the Tropical Western Pacific Ocean. *Marine Pollution Bulletin*, 140, 107–115. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.01.015>
- [37] Kotowska, U., Kapelewska, J., & Sawczuk, R. (2020). Occurrence, removal, and environmental risk of phthalates in wastewaters, landfill leachates, and groundwater in Poland. *Environmental Pollution*, 267, 115643. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115643>
- [38] Beshir, M., Brüggemann, N., Yimer, F., Tadesse, M., Thiele, B., & Hofmann, D. (2023). Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and bis(2-ethylhexyl) phthalate (BEHP) in the soil of Teff-Acacia Decurrens-Charcoal production system in northern Ethiopia. *Land*, 12(12), 2117. <https://doi.org/10.3390/land12122117>
- [39] Fierens, T., Servaes, K., Van Holderbeke, M., Geerts, L., De Henauw, S., Sioen, I., & Vanermen, G. (2012). Analysis of phthalates in food products and packaging materials sold on the Belgian market. *Food and Chemical Toxicology*, 50(7), 2575–2583. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2012.04.029>
- [40] Tran, H. T., Lin, C., Bui, X., Nguyen, M. K., Cao, N. D. T., Mukhtar, H., Hoang, H. G., Varjani, S., Ngo, H. H., & Nghiem, L. D. (2021). Phthalates in the environment: characteristics, fate and transport, and advanced wastewater treatment technologies. *Bioresource Technology*, 344(Pt B), 126249. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126249>
- [41] Henkel, C., Lamprecht, J., Hüffer, T., & Hofmann, T. (2023). Environmental factors strongly influence the leaching of di(2-ethylhexyl) phthalate from polyvinyl chloride microplastics. *Water Research*, 242, 120235. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120235>
- [42] Sokołowski, A., Piskorski, P., Dybowski, M., Szerement, J., Oleszczuk, P., Gao, Y., & Czech, B. (2025). Corn-derived biochar mitigates oxidative stress and increases the content of essential elements in lettuce leaves grown in phthalate-polluted soil. *The Science of the Total Environment*, 986, 179803. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179803>
- [43] Louis, M., Tahrioui, A., Verdon, J., David, A., Rodrigues, S., Barreau, M., Manac'h, M., Thiroux, A., Luton, B., Dupont, C., Le Calvé, M., Bazire, A., Crépin, A., Clabaut, M., Portier, E., Taupin, L., Defontaine, F., Clamens, T., Bouffartigues, E., Cornelis, P., Feuilloley, M., Caillon, J., Dufour, A., Berjeaud, J.-M., Lesouhaitier, O., & Chevalier, S. (2022). Effect of Phthalates and Their Substitutes on the Physiology of *Pseudomonas aeruginosa*. *Microorganisms*, 10(9), 1788. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10091788>
- [44] Chen, X., Xu, S., Tan, T., Lee, S., Cheng, S., Lee, F., Xu, S., & Ho, K. (2014). Toxicity and estrogenic endocrine disrupting activity of phthalates and their mixtures. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 11(3), 3156–3168. <https://doi.org/10.3390/ijerph110303156>
- [45] Yen, P., Lin, T., Chang, C., Yu, C., Kuo, Y., Chang, T., & Liao, V. H. (2024). Di(2-ethylhexyl) phthalate disrupts circadian rhythm associated with changes in metabolites and cytochrome P450 gene expression in *Caenorhabditis elegans*. *Environmental Pollution*, 363(Pt 1), 125062. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.125062>
- [46] Chen, M., Liu, H., Liu, C., Cheng, J., Chang, M., Chiang, S., Liao, W., & Lin, W. (2018). DEHP toxicity on vision, neuromuscular junction, and courtship behaviors of *Drosophila*. *Environmental Pollution*, 243(Pt B), 1558–1567. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.09.063>
- [47] Gu, Y., Gao, M., Zhang, W., Yan, L., Shao, F., & Zhou, J. (2021). Exposure to phthalates DEHP and DINP May lead to oxidative damage and lipidomic disruptions in mouse kidney. *Chemosphere*, 271, 129740. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129740>
- [48] Van Melis, L. V., Zimnik, K. N., Persad, A. R., Bak, T., Van Rossum, M. J., Van Kleef, R. G., Wopken, J. P., Legler, J., & Westerink, R. H. (2025). Exposure to organophosphate flame retardants and phthalates alters neuronal activity and network development. *Toxicology*, 515, 154168. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2025.154168>
- [49] Baj, J., Dring, J. C., Czezelewski, M., Kozyra, P., Forma, A., Fliieger, J., Kowalska, B., Buszewicz, G., & Teresiński, G. (2022). Derivatives of plastics as potential carcinogenic factors: The current state of knowledge. *Cancers*, 14(19), 4637. <https://doi.org/10.3390/cancers14194637>
- [50] Lee, S., Kim, Y., Park, S. W., Kim, M. W., Oh, J., Park, S., Lee, S., Lee, Y. H., Jeong, Y., Park, J. H., Lee, M., Shin, H., Kim, S., Bae, Y. M., Kim, C., & Chung, H. M. (2025). Evaluation of phthalates induced cardiotoxicity using human iPSCs-derived cardiomyocyte and dual-cardiotoxicity evaluation methods. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 296, 118196. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.118196>
- [51] Ma, H., Ma, H., Li, J., Ma, H., & Ma, H. (2025). Associations of phenols, parabens, and phthalates with biological aging: stratified analyses by chronological age and lifestyle in NHANES 2005–2010. *International Journal of Environmental Health Research*, 35(9), 2557–2573. <https://doi.org/10.1080/09603123.2025.2451626>
- [52] Wang, W., & Kannan, K. (2023). Leaching of Phthalates from Medical Supplies and Their Implications for Exposure. *Environmental Science & Technology*, 57(20), 7675–7683. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c09182>
- [53] Nagorka, R., Goral, T., Scholz, U., & Meinecke, S. (2025). Release of high-molecular-weight plasticizers from PVC: mesocosm experiments under near-natural conditions. *Environmental Sciences Europe*, 37(1). <https://doi.org/10.1186/s12302-025-01117-6>
- [54] Palandri, L., Monti, M., Scasserra, M. R., Lugli, C., Fasano, M., Lucaccioni, L., & Righi, E. (2025). Regulatory framework of phthalates and two common alternatives: A review of the European Union legislation. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 271, 114704. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2025.114704>
- [55] Singh, U., Gosu, V., & Subbaramaiah, V. (2025). Review on phthalates: exposure pathways, health risks, regulatory imperatives and mitigation strategies. *Water Air & Soil Pollution*, 236(10). <https://doi.org/10.1007/s11270-025-08263-w>
- [56] Gardi, S., Bonvicini, I., Costa, M., Orsini, F., Polci, L. M., &

- Sarti, G. (2025). Can lead content be measured by handheld X-ray fluorescence spectroscopy to meet REACH regulation? *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 31(4), 944–956. <https://doi.org/10.1002/vnl.22220>
- [57] Olisah, C., Melymuk, L., Audy, O., Kukucka, P., Pribylova, P., & Boudot, M. (2024). Extremely high levels of PBDEs in children's toys from European markets: causes and implications for the circular economy. *Environmental Sciences Europe*, 36(1). <https://doi.org/10.1186/s12302-024-00999-2>
- [58] Radke, B., Wasik, A., Jewell, L. L., Piketh, S., Pączek, U., Gałuszka, A., & Namieśnik, J. (2012). Seasonal changes in organotin compounds in water and sediment samples from the semi-closed Port of Gdynia. *The Science of the Total Environment*, 441, 57–66. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.09.006>
- [59] Malem, F., Soonthondecha, P., Khawmodjod, P., Chunchakorn, V., Whitlow, H. J., & Chienthavorn, O. (2019). Occurrence of phthalate esters in the eastern coast of Thailand. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(10), 627. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7785-5>
- [60] Santhi, V. A., & Mustafa, A. M. (2012). Assessment of organochlorine pesticides and plasticisers in the Selangor River basin and possible pollution sources. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185(2), 1541–1554. <https://doi.org/10.1007/s10661-012-2649-2>
- [61] Eniola, J. O., Sizirici, B., Fseha, Y., Shaheen, J. F., & Abouella, A. M. (2023). Application of conventional and emerging low-cost adsorbents as sustainable materials for removal of contaminants from water. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(38), 88245–88271. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28399-8>
- [62] Fang, H. H., & Zheng, H. (2004). Adsorption of phthalates by activated sludge and its biopolymers. *Environmental Technology*, 25(7), 757–761. <https://doi.org/10.1080/09593330.2004.9619366>
- [63] Cagnon, B., Chatelain, S., De Oliveira, T. F., Versaveau, F., Delpoux, S., & Chedeville, O. (2017). Adsorption of phthalates on activated carbons in monosolute solution and in mix within complex matrices. *Water Air & Soil Pollution*, 228(4). <https://doi.org/10.1007/s11270-017-3315-7>
- [64] Jing, F., Sohi, S. P., Liu, Y., & Chen, J. (2018). Insight into mechanism of aged biochar for adsorption of PAEs: Reciprocal effects of ageing and coexisting Cd²⁺. *Environmental Pollution*, 242(Pt B), 1098–1107. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.07.124>
- [65] Rahmi, Marlina, & Nisfayati. (2018, May). Comparison of cadmium adsorption onto chitosan and epichlorohydrin crosslinked chitosan/eggshell composite. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 352, No. 1, p. 012047). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/352/1/012047>
- [66] Miriyam, I. B., & Anbalagan, K. (2025). Chicken feathers waste biomass as an effective hierarchically porous adsorbent for dimethyl, diethyl and dibutyl phthalate: Mechanism, performance, and modeling of batch and continuous adsorption processes. *Chemical Engineering Science*, 319, 122233. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2025.122233>
- [67] Bouhamidi, Y., Kaouah, F., Nouri, L., Boumaza, S., Trari, M., & Bendjama, Z. (2016). Kinetic, thermodynamic, and isosteric heat of dibutyl and diethyl phthalate removal onto activated carbon from Albizzia julibrissin pods. *Particulate Science and Technology*, 36(2), 235–243. <https://doi.org/10.1080/02726351.2016.1243179>
- [68] Hoch, M., Alonso-Azcarate, J., & Lischick, M. (2003). Assessment of adsorption behavior of dibutyltin (DBT) to clay-rich sediments in comparison to the highly toxic tributyltin (TBT). *Environmental Pollution*, 123(2), 217–227. [https://doi.org/10.1016/s0269-7491\(02\)00402-5](https://doi.org/10.1016/s0269-7491(02)00402-5)
- [69] Wang, X., Ji, H., Wang, F., Cui, X., Liu, Y., Du, X., & Lu, X. (2021). NiFe₂O₄-based magnetic covalent organic framework nanocomposites for the efficient adsorption of brominated flame retardants from water. *Microchimica Acta*, 188(5), 161. <https://doi.org/10.1007/s00604-021-04809-x>
- [70] Cevallos-Mendoza, J., Amorim, C., Rodríguez-Díaz, J., & Montenegro, M. (2022). Removal of Contaminants from Water by Membrane Filtration: A Review. *Membranes*, 12(6), 570. <https://doi.org/10.3390/membranes12060570>
- [71] Johnson, J. K., Salerno, K. M., Schlesinger, D. R., Le, N. Q., Ko, J. S., & Xia, Z. (2022). Removing forever chemicals via amphiphilic functionalized membranes. *Npj Clean Water*, 5(1). <https://doi.org/10.1038/s41545-022-00193-y>
- [72] Moraczewska-Majkut, K., Kudlek, E., Pieczykolan, B., Nocoń, W. K., Żbikowska, K., Będkowski, K., Karolczyk, W., Pyszka, K., & Nowak, N. (2023). Application of membrane filtration and adsorption processes in the removal of micropollutants released from microplastics. *Desalination and Water Treatment*, 315, 458–468. <https://doi.org/10.5004/dwt.2023.30178>
- [73] Feng, G., Jia, R., Sun, S., Wang, M., Zhao, Q., & Liu, L. (2023). Occurrence and treatment effect assessment of organophosphorus flame retardants in source and drinking water, Jinan, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(18), 52830–52840. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25916-7>
- [74] Ezugbe, E. O., & Rathilal, S. (2020). Membrane Technologies in Wastewater Treatment: A review. *Membranes*, 10(5), 89. <https://doi.org/10.3390/membranes10050089>
- [75] Sillanpää, M., Ncibi, M. C., Matilainen, A., & Vepsäläinen, M. (2017). Removal of natural organic matter in drinking water treatment by coagulation: A comprehensive review. *Chemosphere*, 190, 54–71. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.09.113>
- [76] Wang, T., & Liu, T. (2017). Pulse electro-coagulation application in treating dibutyl phthalate wastewater. *Water Science & Technology*, 76(5), 1124–1131. <https://doi.org/10.2166/wst.2017.258>
- [77] Zhao, K., Wang, Y., Du, X., Zhang, X., & Shen, M. (2025). Enhancing the Removal of Diethylhexyl Phthalate from Secondary Effluent Using Guar Gum. *Polish Journal of Environmental Studies*, 34(4), 4435–4444. <https://doi.org/10.15244/pjoes/185503>
- [78] Zoumpouli, G. A., Herron, D., Thornton, A., Jefferson, B., & Campo, P. (2023). The role of coagulation on the fate of PFAS, brominated flame retardants and other trace contaminants in tertiary wastewater treatment for phosphorus control. *The Science of the Total Environment*, 887, 163982. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163982>
- [79] Sravan, J. S., Matsakas, L., & Sarkar, O. (2024). Advances in Biological Wastewater Treatment Processes: Focus on

- Low-Carbon Energy and Resource Recovery in Biorefinery context. *Bioengineering*, 11(3), 281. <https://doi.org/10.3390/bioengineering11030281>
- [80] Khalidi-Idrissi, A., Madinzi, A., Anouzla, A., Pala, A., Mo-uhir, L., Kadmi, Y., & Souabi, S. (2023). Recent advances in the biological treatment of wastewater rich in emerging pollutants produced by pharmaceutical industrial discharges. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(10), 11719–11740. <https://doi.org/10.1007/s13762-023-04867-z>
- [81] Arman, I., Ansari, K. B., Danish, M., Farooqi, I. H., & Jain, A. K. (2023). Ultrasonic-Assisted Feedstock Disintegration for improved biogas production in anaerobic digestion: A review. *BioEnergy Research*, 16(3), 1512–1527. <https://doi.org/10.1007/s12155-023-10608-4>
- [82] Ren, L., Guo, Z., Zhang, L., Hu, H., Li, C., Lin, Z., Zhen, Z., & Zhou, J. L. (2023). A novel aerobic denitrifying phosphate-accumulating bacterium efficiently removes phthalic acid ester, total nitrogen and phosphate from municipal wastewater. *Journal of Water Process Engineering*, 52, 103532. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103532>
- [83] Kamaraj, Y., Jayathandar, R. S., Dhayalan, S., Subramanian, S., & Punamalai, G. (2021). Biodegradation of di-(2-ethylhexyl) phthalate by novel *Rhodococcus* sp. PFS1 strain isolated from paddy field soil. *Archives of Microbiology*, 204(1), 21. <https://doi.org/10.1007/s00203-021-02632-9>
- [84] Ji, M., Giangeri, G., Usman, M., Liu, C., Bosaro, M., Sessa, F., Canu, P., Treu, L., & Campanaro, S. (2023). An integrated Metagenomic-Pangenomic strategy revealed native microbes and magnetic biochar cooperation in plasticizer degradation. *Chemical Engineering Journal*, 468, 143589. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.143589>
- [85] Lin, Z., Yan, Z., Kong, W., Zhou, Y., Xu, Y., Xie, J., Gu, W., Gong, B., Li, Y., & Zhang, C. (2025). Unveiling the simultaneous organophosphate esters degradation mechanisms in biological wastewater nitrogen removal systems under varying phosphorus source conditions: Microbial insights and ecological interactions. *Journal of Hazardous Materials*, 501, 140835. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.140835>
- [86] Felczak, A., Bernat, P., & Długoński, J. (2013). Biodegradation of octyltin compounds by *Cochliobolus lunatus* and influence of xenobiotics on fungal fatty acid composition. *Process Biochemistry*, 49(2), 295–300. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2013.12.001>
- [87] Saad, F. N. M., Remlee, N. N., Zakarya, I. A., Kamaruddin, M. A., Izhar, T. N. T., Ibrahim, M. H., Alam, M., Andini, A., Ratnasari, A., Boopathy, R., & Syafiuddin, A. (2022). Phytoremediation potential of *Azolla pinnata* on water quality and nutrients from agricultural water. *Desalination and Water Treatment*, 271, 38–47. <https://doi.org/10.5004/dwt.2022.28810>
- [88] Latif, A., Abbas, A., Iqbal, J., Azeem, M., Asghar, W., Ullah, R., Bilal, M., Arsalan, M., Khan, M., Latif, R., Ehsan, M., Abbas, A., Bashir, S., Bashir, S., Khan, K. S., Sun, K., Kang, W., Bashir, F., & Chen, Z. (2023). Remediation of environmental contaminants through phytotechnology. *Water Air & Soil Pollution*, 234(3). <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06112-2>
- [89] Liao, C., Nishikawa, Y., & Shih, Y. (2019). Characterization of Di-n-Butyl Phthalate Phytoremediation by Garden Lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *longifolia*) through Kinetics and Proteome Analysis. *Sustainability*, 11(6), 1625. <https://doi.org/10.3390/su11061625>
- [90] Wang, Q., Zhao, H., Xu, L., & Wang, Y. (2019). Uptake and translocation of organophosphate flame retardants (OPFRs) by hydroponically grown wheat (*Triticum aestivum* L.). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 174, 683–689. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.03.029>
- [91] Polińska, W., Kotowska, U., & Karpińska, J. (2024). The problem with benzotriazole ultraviolet stabilizers in the environment - are the aquatic plants the solution for them? *Industrial Crops and Products*, 210, 118050. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118050>
- [92] Çalhan, S. D., Görmez, Ö., Şüküroğlu, A. A., Saçlı, B., & Gözmen, B. (2023). Removal of imipramine using advanced oxidation processes: Degradation products and toxicity evolution. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 58(4), 359–368. <https://doi.org/10.1080/10934529.2023.2187186>
- [93] Iswarya, V., Yuvaraj, T., & Navaneethan, R. (2022). Reduction of Organic Content in Industrial and Residential Wastewater Using Reverse Osmosis and Advanced Oxidation Method by limiting the Total Suspended Solids. In 2022 14th International Conference on Mathematics, Actuarial Science, Computer Science and Statistics (MACS) (p. 1-4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/MACS56771.2022.10022738>
- [94] Zawadzki, P. (2022). Visible Light-Driven Advanced Oxidation Processes to Remove Emerging Contaminants from Water and Wastewater: a Review. *Water Air & Soil Pollution*, 233(9), 374. <https://doi.org/10.1007/s11270-022-05831-2>
- [95] Wafi, A., Aji, D., & Khan, M. M. (2025). Recent advances in photocatalysis: From laboratory to market. *Results in Chemistry*, 18, 102672. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2025.102672>
- [96] Estrada-Vázquez, R., Vaca-Mier, M., Bustos-Terrones, V., Rangel-Peraza, J. G., Loaiza, J. G., & Bustos-Terrones, Y. A. (2023). Assessment of TiO₂ and Ag/TiO₂ photocatalysts for domestic wastewater treatment: synthesis, characterization, and degradation kinetics analysis. *Reaction Kinetics Mechanisms and Catalysis*, 137(2), 1085–1104. <https://doi.org/10.1007/s11144-023-02557-y>
- [97] Liu, K., Wu, T., Xu, L., Zhang, Z., Liu, Z., Wang, L., & Wang, Z. L. (2023). Flexo-photocatalysis in centrosymmetric semiconductors. *Nano Research*, 17(3), 1173–1181. <https://doi.org/10.1007/s12274-023-5957-7>
- [98] Tian, J., Wu, S., Liu, S., & Zhang, W. (2022). Photothermal enhancement of highly efficient photocatalysis with bioinspired thermal radiation balance characteristics. *Applied Surface Science*, 592, 153304. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.153304>
- [99] Chung, Y., & Chen, C. (2023). Coupled photocatalysis and Microalgal-Bacterial synergy system for continuously treating aquaculture wastewater containing real phthalate esters. *Environments*, 10(12), 215. <https://doi.org/10.3390/environments10120215>
- [100] Ye, J., Liu, J., Li, C., Zhou, P., Wu, S., & Ou, H. (2017). Heterogeneous photocatalysis of tris(2-chloroethyl) phosphate by UV/TiO₂: Degradation products and impacts on bacterial proteome. *Water Research*, 124, 29–38. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.07.034>
- [101] Karim, A. V., Krishnan, S., & Shrivastav, A. (2022). An

- overview of heterogeneous photocatalysis for the degradation of organic compounds: A special emphasis on photocorrosion and reusability. *Journal of the Indian Chemical Society*, 99(6), 100480. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2022.100480>
- [102] Xiao, J., Guo, S., Wang, D., & An, Q. (2024). Fenton-Like reaction: recent advances and new trends. *Chemistry - a European Journal*, 30(24), e202304337. <https://doi.org/10.1002/chem.202304337>
- [103] Mielniczek, A. (2024). Reakcja Fentona i jej modyfikacje w technologiach ochrony środowiska. *Gaz Woda i Technika Sanitarna*, 98(1), 28-32. <https://doi.org/10.15199/17.2024.9.4>
- [104] Wongniramaikul, W., Liao, C., & Kanatharana, P. (2007). Diisobutyl phthalate degradation by Fenton treatment. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 42(5), 567-572. <https://doi.org/10.1080/10934520701244243>
- [105] Özmen, F. K. (2021). Treatment of organophosphated flame retardants from waters by hydroxyl radical producing processes and toxicity investigation. *Desalination and Water Treatment*, 224, 216-227. <https://doi.org/10.5004/dwt.2021.27190>
- [106] Liu, C., Yan, L., Zhu, L., Yu, Y., Tai, Y., Yu, Y., Liu, Q., & Li, L. (2024). Highly efficient removal of tetrabromobisphenol A by Fenton degradation with iron-modulated zeolite under nanoconfinement. *Colloids and Surfaces a Physicochemical and Engineering Aspects*, 698, 134537. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.134537>
- [107] Hoigné, J. (1988). The Chemistry of Ozone in Water. In: *Process Technologies for Water Treatment*. Earlier Brown Boveri Symposia. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-8556-1_11
- [108] Rame, R., Purwanto, P., & Sudarno, S. (2023). A comprehensive review on catalytic ozonation: emerging trends and future perspectives. *Desalination and Water Treatment*, 315, 260-279. <https://doi.org/10.5004/dwt.2023.30134>
- [109] Zhang, J., Liu, L., Shi, H., Li, X., & Zhang, X. (2020). Decomposition of dibutyl phthalate in goat whey solution by different catalytic ozonation treatments: Performance and efficiency. *Environmental Technology & Innovation*, 20, 101165. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101165>
- [110] Cristale, J., Ramos, D. D., Dantas, R. F., Machulek, A., Junior, Lacorte, S., Sans, C., & Esplugas, S. (2015). Can activated sludge treatments and advanced oxidation processes remove organophosphorus flame retardants? *Environmental Research*, 144(Pt A), 11-18. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.10.008>
- [111] Lovato, M. E., Gilliard, M. B., Cassano, A. E., & Martín, C. A. (2014). Kinetics of the degradation of n-butyl benzyl phthalate using O₃/UV, direct photolysis, direct ozonation and UV effects. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(2), 909-917. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-2796-9>
- [112] Sidnell, T., Hurst, J., Lee, J., & Bussemaker, M. J. (2024). Increasing efficiency and treatment volumes for sonolysis of per- and poly-fluorinated substances, applied to aqueous film-forming foam. *Ultrasonics Sonochemistry*, 105, 106866. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2024.106866>
- [113] Song, S., Xia, M., He, Z., Ying, H., Lü, B., & Chen, J. (2006). Degradation of p-nitrotoluene in aqueous solution by ozonation combined with sonolysis. *Journal of Hazardous Materials*, 144(1-2), 532-537. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.10.067>
- [114] Roslan, N. N., Lau, H. L. H., Suhaimi, N. a. A., Shahri, N. N. M., Verinda, S. B., Nur, M., Lim, J., & Usman, A. (2024). Recent Advances in advanced oxidation processes for degrading pharmaceuticals in Wastewater—A review. *Catalysts*, 14(3), 189. <https://doi.org/10.3390/catal14030189>
- [115] Psillakis, E., Mantzavinos, D., & Kalogerakis, N. (2003). Monitoring the sonochemical degradation of phthalate esters in water using solid-phase microextraction. *Chemosphere*, 54(7), 849-857. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2003.09.039>
- [116] Abdullah, A. M., Quinete, N. S., Gardinali, P., & O'Shea, K. (2020). Investigation of ultrasonically induced degradation of Tris(2-chloroethyl) phosphate in water. *Journal of Environmental Engineering*, 146(10). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)jee.1943-7870.0001793](https://doi.org/10.1061/(asce)jee.1943-7870.0001793)
- [117] Perkola, N., Vaalgamaa, S., Jernberg, J., & Vähätalo, A. V. (2016). Degradation of artificial sweeteners via direct and indirect photochemical reactions. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(13), 13288-13297. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6489-4>
- [118] Su, C., Chen, S., Sun, B., Zhang, Z., Li, S., He, Y., & Shan, S. (2025). Investigation on the inhibition of discoloration in methyltin mercaptide solution. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 99(9), 2081-2095. <https://doi.org/10.1134/s0036024425701535>
- [119] Chen, C., Chen, L., Yao, Y., Artigas, F., Huang, Q., & Zhang, W. (2019). Organotin Release from Polyvinyl Chloride Microplastics and Concurrent Photodegradation in Water: Impacts from Salinity, Dissolved Organic Matter, and Light Exposure. *Environmental Science & Technology*, 53(18), 10741-10752. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b03428>
- [120] Chen, L., Wang, Z., Wang, Z., & Gu, X. (2016). Influence of humic acid on the photolysis of triclosan in different dissociation forms. *Water Air & Soil Pollution*, 227(9). <https://doi.org/10.1007/s11270-016-3024-7>
- [121] Hopanna, M., He, K., & Blaney, L. (2025). Photochemical fate of triphenyltin pesticides in engineered UV and UV-H₂O₂ treatment systems: Reaction kinetics, transformation products, and residual toxicity. *Journal of Hazardous Materials*, 497, 139542. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.139542>