

Narażenie strażaków na substancje per- i polifluoroalkilowe (PFAS) jako zagrożenie zawodowe: przegląd

Termin "strażak" i "rak" stały się w ostatniej dekadzie tak splecione, że są niemal nierozłączne. Narażenie strażaków na czynniki rakotwórcze może zwiększyć ryzyko rozwoju różnych rodzajów nowotworów. PFAS to jedna z głównych klas rakotwórczych substancji, na które strażacy są narażeni jako zagrożenie zawodowe. W ostatnich badaniach zaobserwowano podwyższone poziomy PFAS w surowicy krwi strażaków. Możliwe źródła narażenia zawodowego na PFAS to wyposażenie zwrotnicowe, wodna pianka formująca film oraz powietrze i pył zarówno na miejscu pożaru, jak i na remizie strażackiej. Wstępna dyskusja na temat PFAS obejmuje definicję, klasyfikację oraz strukturę chemiczną. Następnie przegląd jest zidentyfikowany przez wskazanie źródeł PFAS, z którymi strażacy mogą się spotkać jako zagrożenie zawodowe. Analizowane są właściwości strukturalne PFAS stosowanych w zidentyfikowanych źródłach, ich degradacja oraz drogi narażenia. Omawiany jest podwyższony poziom PFAS w surowicy krwi oraz to, jak może to wiązać się ze zwiększonym ryzykiem zachorowania na raka. Nasz przegląd pokazuje znaczną ilość PFAS na sprzęcie wylotowym i ich migrację do nieprzetworzonych warstw, a także pokazuje, jak sam sprzęt wyciągowy może być potencjalnym źródłem ekspozycji na PFAS. PFAS pochodzące z wodnych pian formujących film (AFFF), powietrze oraz pył z remizacji zostały już uznane za potencjalne źródła ekspozycji. Badania nad rakiem u strażaków sugerują, że strażacy mają wyższe ryzyko raka w porównaniu z ogólną populacją. Przegląd ten sugeruje, że zwiększone narażenie na PFAS jako zagrożenie zawodowe może stanowić potencjalne ryzyko raka dla strażaków.

1 Wprowadzenie

"Strażak" i "rak" to dwa słowa, które niestety zostały ze sobą powiązane w ciągu ostatniej dekady. W 2022 roku Międzynarodowa Agencja Badań nad Rakiem (IARC) przeklasyfikowała zawód strażaka jako rakotwórczy "Grupy 1" (rakotwórczy dla człowieka) ([Demers i in., 2022](#)). To zajęcie zostało po raz pierwszy sklasyfikowane w 2010 roku jako "Grupa 2B", co oznacza potencjalnie rakotwórcze ([Grupa robocza IARC ds. oceny ryzyka rakotwórczego dla ludzi, 2010](#)). Kilka badań analizowało ryzyko nowotworów i śmiertelność wśród strażaków. Chociaż badania wykazały niespójne wyniki, zgłaszano ogólne wskazania podwyższonego ryzyka kilku nowotworów u strażaków, takie jak badania wykazały podwyższone podsumowujące szacunki ryzyka (SRE) dla wielu nowotworów, w tym chłoniaka nieziarnicznego (NHL), szpiczaka, raka jąder i prostaty ([LeMasters i in., 2006](#); [Soteriades i in., 2019](#); [Laroche i L'Espérance, 2021](#)). Inne badanie wykazało ryzyko nowotworów wśród strażaków o standaryzowanych wskaźnikach zachorowalności (mSIR); badanie wykazało wzrost mSIR w leczeniu czerniaka skóry i raka prostaty wśród strażaków ([Casjens i in., 2020](#)). Badania finansowane przez National Institute of Occupational Safety and Health (NIOSH) również odnotowały podwyższoną śmiertelność i wskaźniki zachorowalności na raka ([Daniels i in., 2014](#); [Daniels i in., 2015](#)). Podobnie badanie Indianie wykazało wyższą śmiertelność z nowotworami złośliwymi u strażaków w porównaniu do osób nie-strażackich ([Muegge i in., 2018](#)). Znacząco podwyższone ryzyko raka skóry, tarczycy, jąder i prostaty odnotowano także u mężczyzn strażaków na Florydzie ([Lee i in., 2020](#)). Podobnie badania w wielu innych krajach oraz w Stanach Zjednoczonych wykazały podwyższone wskaźniki występowania różnych typów nowotworów, takich jak nerki, pęcherz, jądra, prostata, szpiczak mnogi oraz chłoniak nieziarnikowy ([Delahunt i in., 1995](#); [Bates, 2007](#); [Kang i in., 2008](#); [Ahn i in., 2012](#)). Udokumentowano, że gaszenie pożarów wiąże się

z narażeniem zarówno na znane, jak i potencjalnie rakotwórcze substancje ([Soteriades i in., 2019](#); [Laroche i L'Espérance, 2021](#)). Nawet jeśli czas naświetlania może być krótszy, poziom ekspozycji może być wysoki ([Jalilian i in., 2019](#)).

Urazy spowodowane termicznymi i termofizjologicznymi zagrożeniami komfortowymi podczas gaszenia pożarów są powszechne wśród strażaków ([Mandal i in., 2021](#); [Mazumder, 2021](#); [Mazumder i in., 2022](#)). Oprócz zagrożeń dla komfortu termicznego i termofizjologicznego, narażenie na szkodliwe chemikalia, które mogą przyczyniać się do zwiększonego ryzyka raka, stało się coraz większym problemem w społeczności strażackiej ([Trowbridge i in., 2020](#); [Muensterman i in., 2021](#)). Badania wykazały, że strażacy są narażeni na działanie substancji niebezpiecznych podczas pożarów konstrukcyjnych ([Fent i in., 2014](#)), fazy remontu ([Jones i in., 2016](#); [Oliveira i in., 2017](#)) oraz pożary pojazdów ([Fent i Evans, 2011](#); [Jalilian i in., 2019](#)). Związki występujące w dymie ogniowym oraz ich toksyczność znacznie różnią się w zależności od warunków i materiałów, ponieważ każde palenie ma swój unikalny wzorzec ([Golka i Weistenhöfer, 2008](#); [Casjens i in., 2020](#)). Jednak badania wykazały policyjne węglowodory aromatyczne (PAH) ([Keir i in., 2020](#)), 1,3- butadiene ([Laitinen i in., 2012](#)), metal ([Keir i in., 2020](#)), formaldehyd ([Driscoll i in., 2016](#)) oraz substancje per- i polifluoroalkilowe (PFAS) ([Jin i in., 2011](#); [McGuire i in., 2014](#)) są najbardziej niepokojącymi substancjami chemicznymi ([Muensterman i in., 2021](#)). Ponadto, oprócz miejsca pożaru, niebezpieczne chemikalia znaleziono także w kurzach strażackich, wodnych piankach formujących film (AFFF), skażonym sprzęcie strażackim oraz w sprzęcie zjazdowym ([Brown i in., 2014](#); [Fent i in., 2015](#); [Shen i in., 2015](#); [Alexander i Baxter, 2016](#); [Barzen-Hanson i in., 2017](#)).

PFAS to duża klasa fluorowanych alifatycznych chemikaliów, które mają zróżnicowane zastosowanie ([Young i in., 2021](#)). Ze względu na ich skrajną toksyczność, trwałość i bioakumulację, te substancje stanowią istotne zagrożenie dla środowiska i zdrowia ludzi ([Blum i in., 2015](#); [Cousins i in., 2016](#); [Wang i in., 2017](#); [Goldenman i in., 2019](#)). PFAS wykrywa się w surowicy krwi u ponad 98% Amerykanów ([Calafat Antonia i in., 2007](#)). Ogół społeczeństwa naraża się na PFAS poprzez wodę pitną, skażoną żywność, opakowania żywności, naczynia kuchenne, kurz w pomieszczeniach oraz powietrze w otoczeniu ([Nadal i Domingo, 2014](#); [Sjögren i in., 2016](#); [Mastrantonio i in., 2018](#); [Domingo i Nadal, 2019](#)). Spośród wielu innych PFAS, najbardziej intensywnie stosowane i badane były kwas perfluorooktanowy (PFOA) oraz sulfonian perfluorooktanu (PFOS). Jednak ich stosowanie było zakazane lub ściśle regulowane w wielu krajach od kilku lat. Badania pokazują, że podwyższony poziom ekspozycji na PFAS wiąże się z niekorzystnymi skutkami zdrowotnymi, takimi jak rak jąder i nerek ([Vaughn i in., 2013](#); [Vieira Verónica i in., 2013](#)). Podobnie badania wykazały również powiązania między PFOA a nowotworami, takimi jak międzybłoniak, prostata, jądra oraz chłoniak nieziarnikowy ([Vaughn i in., 2013](#); [Chang i in., 2014](#)). Te cztery nowotwory należą do ośmiu najczęstszych, na które strażacy mają większe ryzyko w porównaniu z opinią publiczną ([LeMasters i in., 2006](#); [Daniels i in., 2014](#)). Dlatego obawy dotyczące narażenia na PFAS w straży pożarnej oraz ryzyka zdrowotnego strażaków są uzasadnione.

Zwiększone ryzyko zachorowania na raka u strażaków może być spowodowane narażeniem zawodowym na PFAS ([Trowbridge i in., 2020](#)). PFAS są szczególnie istotne w gaszeniu pożarów, ponieważ te chemikalia są stosowane w odzieży ochronnej strażaków i sprzęcie do zapewnienia odporności na wodę i olej ([Peaslee i in., 2020](#); [Muensterman i in., 2021](#); [van der Veen i in., 2022](#)), jako polimerowe membrany w barierach przeciwwilgociowych, w AFFF wykorzystywane do

gaszenia pożarów paliwa i oleju ([Kissa, 1994](#); [Kissa, 2001](#); [Barzen-Hanson i in., 2017](#)), a najnowsze badania wykazały również podwyższony poziom PFAS w kurzu i powietrzu remizacji strażackich ([Henry i in., 2018](#); [Young i in., 2021](#)). Wyposażenie składowe noszone przez strażaków jest szeroko impregnowane fluoropolimerami (jedną z form PFAS) lub fluoropolimerami łańcuchów bocznych, aby uzyskać najwyższy poziom odporności na wodę i olej ([Henry i in., 2018](#); [Young i in., 2021](#)). PFAS zawiera także politetrafluoroetylen (PTFE), wysoce odstraszający materiał stosowany w barierze przeciwwilgociowej do ograniczania migracji wody i płynów ustrojowych przez urządzenia zwrotne ([Islam i in., 2020](#); [Muensterman i in., 2021](#)). Strażacy mogą być również narażeni na chemikalia PFAS podczas szkolenia i gaszenia pożarów pochodzących z fluorowanych pian gaśniczych, które głównie zawierają PFAS z kategorii kwasów sulfonowanych ([Dauchy i in., 2017](#)). Ponadto jedno z ostatnich badań wykazało podwyższony poziom PFOS w pyłku zbieranym z części mieszkalnej remiz: piętnaście razy wyższe niż poziom mediany ([Young i in., 2021](#)).

Przeprowadzono kilka przeglądów systemowych dotyczących nowotworów ludzkich i PFAS ([Sunderland i in., 2019](#); [Imir i in., 2021](#); [Steenland i Winquist, 2021](#); [Boyd i in., 2022](#)). Nowotwory strażaków ([LeMasters i in., 2006](#); [Ahn i in., 2012](#); [Jalilian i in., 2019](#); [Soteriades i in., 2019](#); [Casjens i in., 2020](#); [Lee i in., 2020](#); [Laroche i L'Espérance, 2021](#)) oraz stężenia PFAS w surowicy we krwi ([Dobraca i in., 2015](#); [Gribble i in., 2015](#); [Rotander i in., 2015](#); [Olsen i in., 2017](#); [Graber i in., 2019](#); [Kotlarz i in., 2020](#); [Trowbridge i in., 2020](#)) również były szeroko badane. Obecność PFAS w AFFF, a tym samym zanieczyszczenie wód gruntowych, również została dokładnie przebadana ([Rotander i in., 2015](#); [Barzen-Hanson i in., 2017](#); [Høisæter i in., 2019](#); [Gonzalez i in., 2021](#)). W ciągu ostatniej dekady obecność niebezpiecznych chemikaliów w pyłach strażackich została również odnotowana przez kilka badań ([Brown i in., 2014](#); [Banks i in., 2020](#); [Hall i in., 2020](#); [Young i in., 2021](#)). Jednak tylko kilka niedawno opublikowanych badań naukowych wspomniało o obecności PFAS w samym wyposażeniu wylotowym ([Peaslee i in., 2020](#); [Muensterman i in., 2021](#); [van der Veen i in., 2022](#)). Dodatkowo, niedawne badanie przeanalizowało narażenie strażaków na PFAS na pianę tworzącą warstwę wodną ([Rosenfeld i in., 2023](#)). Jednak według najlepszej wiedzy autorów, nie przeprowadzono kompleksowego przeglądu wszystkich źródeł PFAS, na które strażacy mogą być narażeni jako na zagrożenie zawodowe, ani ich ścieżek narażenia. Dlatego niniejszy przegląd wyraźnie omawia źródła PFAS jako narażenie zawodowe, ich ścieżki oraz to, jak mogą one powodować zwiększone ryzyko raka u strażaków.

2 Metody

Przegląd ten przeprowadzono w trzech etapach. Na początek przeprowadzono wstępną dyskusję na temat PFAS, która obejmuje definicję, klasyfikację i struktury chemiczne większości powszechnych PFAS. W drugim etapie zidentyfikowano źródła ekspozycji na PFAS jako zagrożenia zawodowe związane z gaszeniem pożarów. Źródła PFAS, w tym ich chemia i szlaki degradacji, zostały omówione zgodnie z literaturą. W trzecim etapie zidentyfikowano podwyższony poziom PFAS w surowicy krwi oraz zwiększone ryzyko nowotworów u strażaków.

Krok 1: Klasyfikacja PFAS Definicja i klasyfikacja PFAS były omawiane w różnych źródłach literatury. Wciąż brakuje powszechnie akceptowanej definicji PFAS. Powszechnie występujące PFAS zostały zidentyfikowane w literaturze. Ponadto zidentyfikowano PFAS, które są głównie

związane ze służbą pożarną, biorąc pod uwagę zagrożenie zawodowe strażaków, jak podano w literaturze.

Krok 2: Identyfikacja źródeł PFAS jako narażenia zawodowego strażaków. Jak podaje wiele recenzowanych czasopism, jednym z najczęstszych źródeł ekspozycji strażaków na PFAS jest AFFF, który służy do gaszenia pożarów klasy B. AFFF są szeroko stosowane w gaszeniu pożarów i stanowią jedną z głównych przyczyn skażenia wód gruntowych PFAS ([Houtz i in., 2013](#); [Cousins i in., 2016](#); [Barzen-Hanson i in., 2017](#); [Peaslee i in., 2020](#)). W związku z tym problem zdrowia zawodowego związany z PFAS wynikający z AFFF stał się bardziej powszechny wśród strażaków ([Laitinen i in., 2014](#); [Gao i in., 2015](#); [Grandjean i Clapp, 2015](#); [Rotander i in., 2015](#); [Mastrantonio i in., 2018](#)). PFAS, które mogą powstać z trwałego wykończenia odstrasznego na wodę i olej (DWR) w wyposażeniu zwrotnym, stały się niedawno pojawiającym się tematem ([Peaslee i in., 2020](#); [Muensterman i in., 2021](#)). PFAS wykryto w nowym i używanym sprzęcie zwrotnym ([Rewerts i in., 2018](#); [Peaslee i in., 2020](#); [Muensterman i in., 2021](#); [Shinde i Ormond, 2021](#)). Zewnętrzna powłoka mechanizmu zwrotniczego jest zazwyczaj impregnowana polimerami fluorowanymi łańcuchami bocznymi, a następnie stosuje się barierę przeciwwilgociową opartą na politetrafluoretylenie (PTFE) ([Holmquist i in., 2016](#); [Henry i in., 2018](#)). Ponadto strażacy mogą być narażeni na PFAS podczas gaszenia pożarów konstrukcyjnych lub samochodowych, które mogą uwalniać PFAS w dymie w wyniku spalania różnych materiałów zawierających PFAS. Ponadto wykryto wysokie stężenia PFAS w kurzu i powietrzu wewnątrz remis strażackich ([Hall i in., 2020](#); [Young i in., 2021](#)). Dlatego środowisko otaczające miejsce pożaru i remizę strażacką również jest potencjalnym źródłem ekspozycji na PFAS ([Hall i in., 2020](#); [Muensterman i in., 2021](#); [Young i in., 2021](#)). Wypłukiwanie zarówno lotnych, jak i nielotnych substancji PFAS z urządzeń zwrotnych i AFFF może być powiązane z większą ilością PFAS w remizach strażackich.

Krok 3: PFAS w surowicy krwi i nowotworach strażaków. Jak wspomniano powyżej, zawód strażaka został sklasyfikowany przez IARC jako znany czynnik rakotwórczy ([Demers i in., 2022](#)). Analizowane są różne ścieżki narażenia strażaków na PFAS. Spożycie, wdychanie i wchłanianie przez skórę to najczęstsze drogi ekspozycji, jak podają w literaturze. Omawiane są podwyższone poziomy PFAS w surowicy krwi oraz ich związek z niektórymi typami ryzyka nowotworów. Kilka badań nad PFAS w surowicy krwi ([Gribble i in., 2015](#); [Olsen i in., 2017](#); [Graber i in., 2019](#); [Kotlarz i in., 2020](#)) oraz zgłaszano nowotwory u strażaków ([LeMasters i in., 2006](#); [Soteriades i in., 2019](#); [Casjens i in., 2020](#); [Laroche i L'Espérance, 2021](#)).

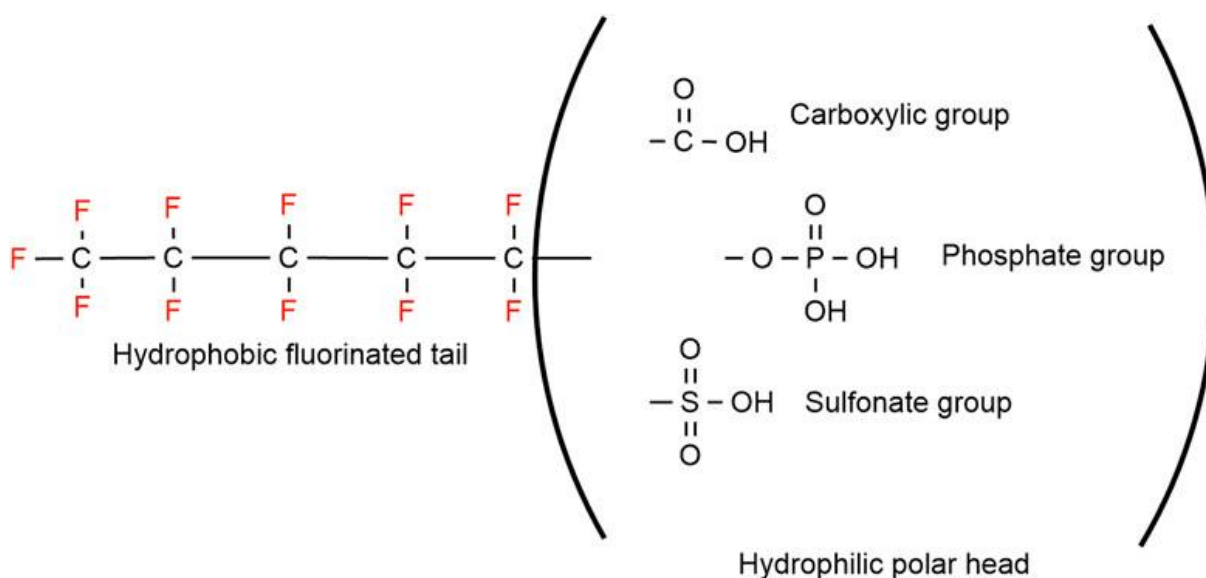
3 Definicja i klasyfikacja PFAS

W 2011 roku PFAS został zdefiniowany przez [Buck i in. \(2011\)](#) jako "alifatyczne silnie fluorowane substancje zawierające jeden lub więcej atomów C, na których atomy fluoru zastąpiły wszystkie atomy wodoru, tak że substancja zawiera perfluoroalkilową część C_nF_{2n+1} ." Jednak Organizacja Współpracy Gospodarczej i Rozwoju (OECD) poinformowała w 2018 roku, że cząsteczki posiadające w pełni fluorowane atomy węgla, ale pozbawione grupy $-CF_3$, nie spełniają wymagań poprzedniej definicji [Buck i in., 2011](#) ([OECD, 2018](#)). Dlatego, aby rozwiązać ten spór, OECD zaproponowała zdefiniowanie PFAS jako: "substancje fluorowane zawierające co najmniej jeden w pełni fluorowany atom metylu lub metylenu węgla (bez przyłączonego do niego atomu H/Cl/Br/I), np. z kilkoma zauważalnymi wyjątkami (reprezentowanym przez atom węgla z przyłączonymi atomami H/Cl/Br/I), każda substancja chemiczna z co najmniej

perfluorowaną grupą metylową ($-\text{CF}_3$) lub perfluorowaną grupą metyleniową ($-\text{CF}_2-$) jest a PFAS" (OECD, 2021). Dlatego może to być dość zaskakujące, ale wciąż jest potrzebna powszechnie akceptowana definicja PFAS (Panieri i in., 2022).

Grupowanie PFAS na dwie szerokie kategorie: polimerowe i niepolimerowe (Rysunek 1) cząsteczki są najczęściej stosowanym systemem klasyfikacji PFAS, zaproponowanym przez Buck i in. (2011). Niepolimerowe PFAS można dalej podzielić na substancje perfluoroalkilowe i polifluoroalkilolowe. Długość łańcucha fluorowanego węgla jest najczęściej używana przy klasyfikacji niepolimerowych PFAS. Bioakumulacja, właściwości fizykochemiczne i wiązania białek, a także rozkład losów środowiskowych, można przewidzieć na podstawie długości łańcucha fluorowanego węgla (Dai i in., 2013; Zhao i in., 2016; Johnson i in., 2021; Lu i in., 2021). Jeśli wszystkie atomy wodoru w każdym atomie węgla zostały zastąpione fluorem z wyjątkiem końca końcowego, związek ten nazywany jest substancją perfluoroalkilową (Rysunek 1) (Bank i in., 1994). Pierwszymi dostępnymi substancjami PFAS były perfluoroalkilosulfonianiny (np. perfluorooktanowy sulfonianin, $\text{C}_8\text{F}_{15}\text{SO}_3^-$, PFOS) oraz kwasy karboksylowe perfluoroalkilowe (np. kwas perfluorooktanowy, $\text{C}_7\text{F}_{15}\text{COOH}$, PFOA), które były wytwarzane w procesie elektrochemicznym fluorowanym (ECF) (Simons, 1949). Wysoka stabilność termiczna i chemiczna oraz obniżenie napięcia powierzchniowego w układach wodnych nawet przy niskim stężeniu to unikalne właściwości dla powszechnego stosowania substancji PFAS (Grajeck i Peterson, 1959; Holzapfel, 1966; Buck i in., 2011). Kwasy perfluoroalkilowe (PFAA) są najczęściej produkowanymi komercyjnie perfluoroczynnymi surfaktantami, do których należą kwas perfluoroalkilo-sulfonowy ($\text{F}(\text{CF}_2)_n\text{SO}_3\text{H}$, H, PFSA), kwas karboksylowy perfluoroalkilowy ($\text{F}(\text{CF}_2)_n\text{CO}_2\text{H}$, H, PFCA), kwas perfluoroalkilofosfonowy ($\text{F}(\text{CF}_2)_n\text{P}(=\text{O})(\text{OH})_2$, PFPA) oraz kwas perfluoroalkilofosfinowy ($\text{F}(\text{CF}_2)_n\text{P}(=\text{O})(\text{OH})$, PFPIA) (Buck i in., 2011).

FIGURE 1

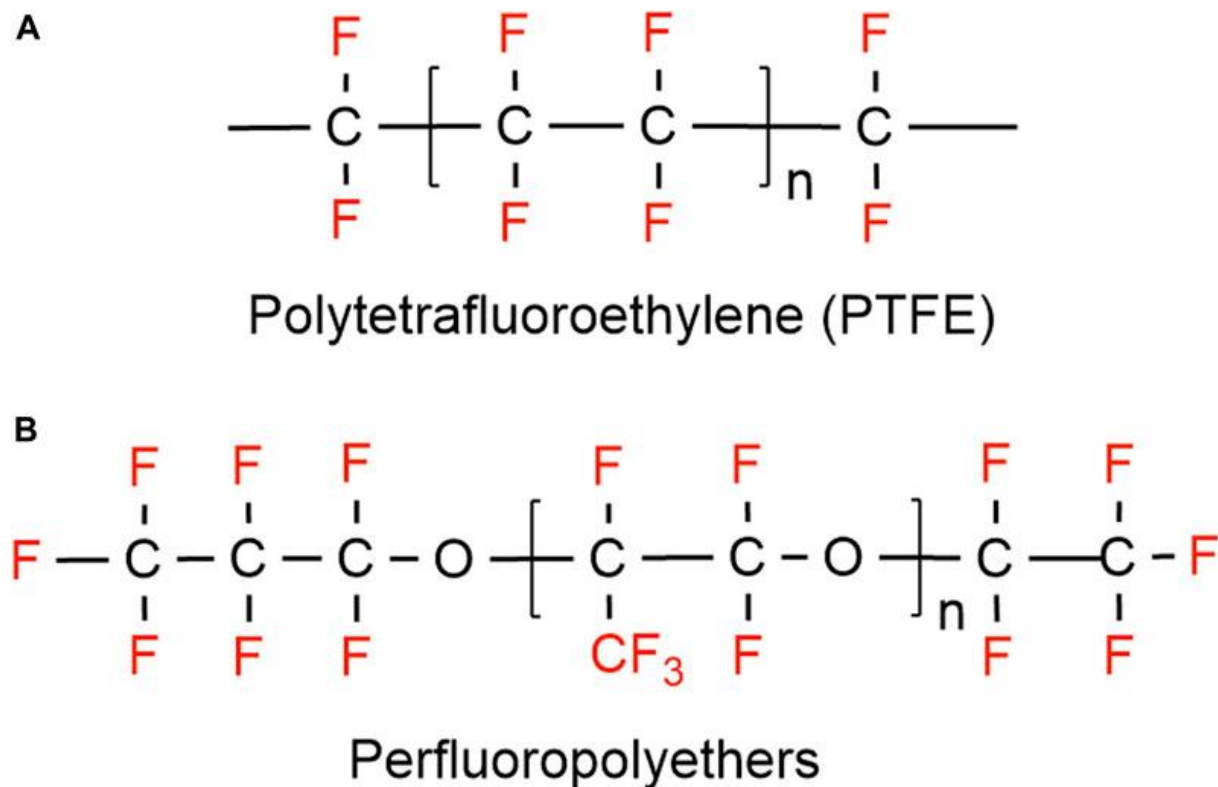


RYSUNEK 1. Ogólna struktura niepolimerowych, perfluorowanych substancji PFAS.

Z kolei substancje, w których nie wszystkie atomy wodoru (ale więcej niż jeden) zostały zastąpione fluorem, klasyfikuje się jako substancje polifluoroalkilowe (np. alkohol fluorotelomerowy 6:2 (FTOH)) (Smart, 1994). Różne typy substancji polifluoroalkilowych to:

1) fluoropolimery, czyli substancje, w których większość atomów wodoru łańcucha węglowego jest zastępowana przez atomy fluorku (np. PVDF, PTFE), 2) polimery fluorowane łańcuchami bocznymi, gdzie łańcuchy poli/perfluorowane są połączone z łańcuchami węgla niefluoryzowanym (np. fluorowane akrylanowe polimery), 3) perfluoropolieter, gdzie łańcuch szkieletowy zawiera tleny i atomy fluorku bezpośrednio związane z łańcuchem węglowym, są klasyfikowane jako polimerowe PFAS ([Rysunek 2](#)) ([Panieri i in., 2022](#)).

FIGURE 2



RYSUNEK 2. Polimerowe substancje PFAS, **(A)** PTFE, **(B)** perfluoropolieter.

The classification of PFAS has been summarized in [Table 1](#).

TABLE 1

	Perfluorinated		Polyfluorinated	
	Subgroup	Example	Subgroup	Example
Non-polymeric PFAS	Perfluoroalkyl acids (PFAAs) Perfluoroalkane sulfonic acids & sulfonates (PFSAs) Perfluoroalkane sulfinic acids (PFSIAs) Perfluorocarboxylic acids & carboxylates (PFCAs) Perfluoroalkyl phosphonic acids (PFPA)s Perfluoroalkyl phosphinic acids (PFPIAs)	PFBS, PFHxS, PFOS PFOSI PFBA, PFHxS, PFOA C8-PFPA C8/C8-PFPIA	Fluorotelomer compounds (FT)	6:2 FTO, 8:2 FTI
			Perfluoroalkane sulfonamido compounds (Me/Et/Bu-FASAs) Miscellaneous	MeFOSA, FOSE 4,8-Dioxa-3H-perfluorononanoate
	Perfluoroalkyl ether acids (PFEAs)	GenX, Adona, F-53B		
	Perfluoroalkane sulfonamides (FASA)	FOSA		
	Perfluoroalkane sulfonyl fluorides (PASFs)	PBSF, POSF		
	Perfluoroalkyl iodides (PFAIs)	PFHxI		
	Perfluoroalkanonyl fluorides (PAFs)	POF		
	Perfluoroalkyl aldehydes (PFALs)	PENAL		
Polymeric PFAS	Subgroup		Example	
	Fluoropolymers		PVDF, FEP, PFA, ETFE, PTFE	
	Side-chain Fluorinated Polymers		Fluorinated urethane/acrylate/methacrylate/oxetane polymers	
	Perfluoropolyethers (PFPEs)		PEPE-BP, Fluorolink-PFPE	

TABLE 1. List of the PFAS according to their categories and subgroups [adapted from ([Panieri et al., 2022](#))].

4. Źródła narażenia na PFAS

Strażacy mogą być narażeni na kilka rodzajów PFAS w trakcie wykonywania swoich codziennych obowiązków. Poniżej omówiono typowe potencjalne źródła zawodowego narażenia strażaków na PFAS.

4.1. Strażackie ubranie specjalne (turnout ensemble)

4.1.1. Powłoka zewnętrzna

Wykończenia hydrofobowe (odpychające wodę) i olejofobowe (odpychające oleje) zapewniają tkaninie zdolność do opierania się zwilżaniu w kontakcie z wodą i substancjami olejowymi. Przy wysokim poziomie odpychania, krople zarówno wody, jak i oleju powinny pozostawać na powierzchni tkaniny i łatwo z niej spływać (Sayed i Dabhi, 2014). Prosta powłoka z parafiny lub wosku to najstarsza forma wykończenia wodoodpornego, która z czasem ulega wypłukaniu (Sayed i Dabhi, 2014). Powierzchnię tkaniny można uczynić hydrofobową poprzez proste zaimpregnowanie jej woskiem węglowodorowym lub olejem silikonowym, co pozwoli odpychać wodę. Jednakże wykończenie powierzchni tkaniny tak, aby odpychała jednocześnie wodę i olej, jest dość trudne (Mahltig, 2015). Wszystkie środki olejofobowe są jednocześnie hydrofobowe, ale nie wszystkie środki hydrofobowe są olejofobowe. Napięcie powierzchniowe większości olejów wynosi poniżej 15 dyn/cm, dlatego uzyskanie olejofobowości wymagało obniżenia napięcia powierzchniowego poniżej 15 dyn/cm, co jest możliwe do osiągnięcia wyłącznie przy użyciu impregnacji fluorowęglowej. Odporność na wodę (napięcie powierzchniowe 72 dyn/cm) jest łatwa do uzyskania za pomocą silikonów, wosków węglowodorowych i innych technologii. Kąt zwilżania wody na powierzchni może być wykorzystany do prostego określenia i sklasyfikowania zachowania podczas zwilżania (Rysunek 3) (Marmur, 2006; Posner, 2012). Powierzchnie o kącie zwilżania 90° lub wyższym są zazwyczaj uważane za hydrofobowe

(Mahltig, 2015). W przypadku szorstkich powierzchni, takich jak tekstylia, odnotowano kąty zwilżania wody nawet powyżej 150° (Shibuichi i wsp., 1998). Zamiast kąta zwilżania używa się terminu „napięcie powierzchniowe” w celu oszacowania stopnia zwilżalności. Napięcie powierzchniowe zależy zazwyczaj od składu chemicznego danego materiału (np. ciała stałego lub cieczy). Aby tkanina odpychała daną ciecz (np. wodę, olej), napięcie powierzchniowe powierzchni tekstylnej musi być niższe niż napięcie tej cieczy (Mahltig, 2015). Związki fluorowane stanowią klasę materiałów, które odpychają zarówno wodę, jak i olej (Mahltig, 2015). FIGURE 3

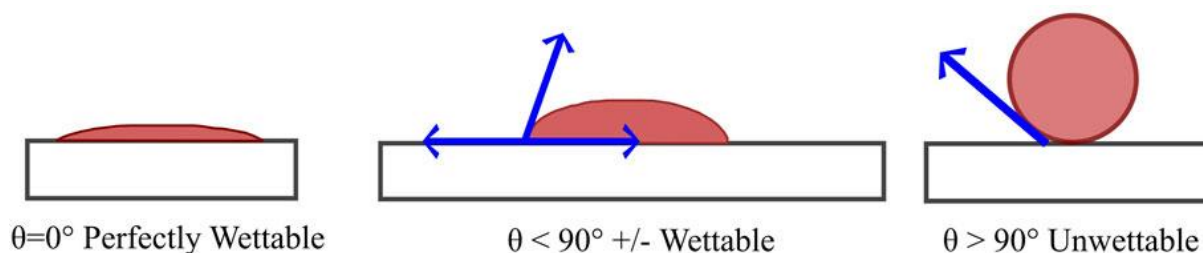
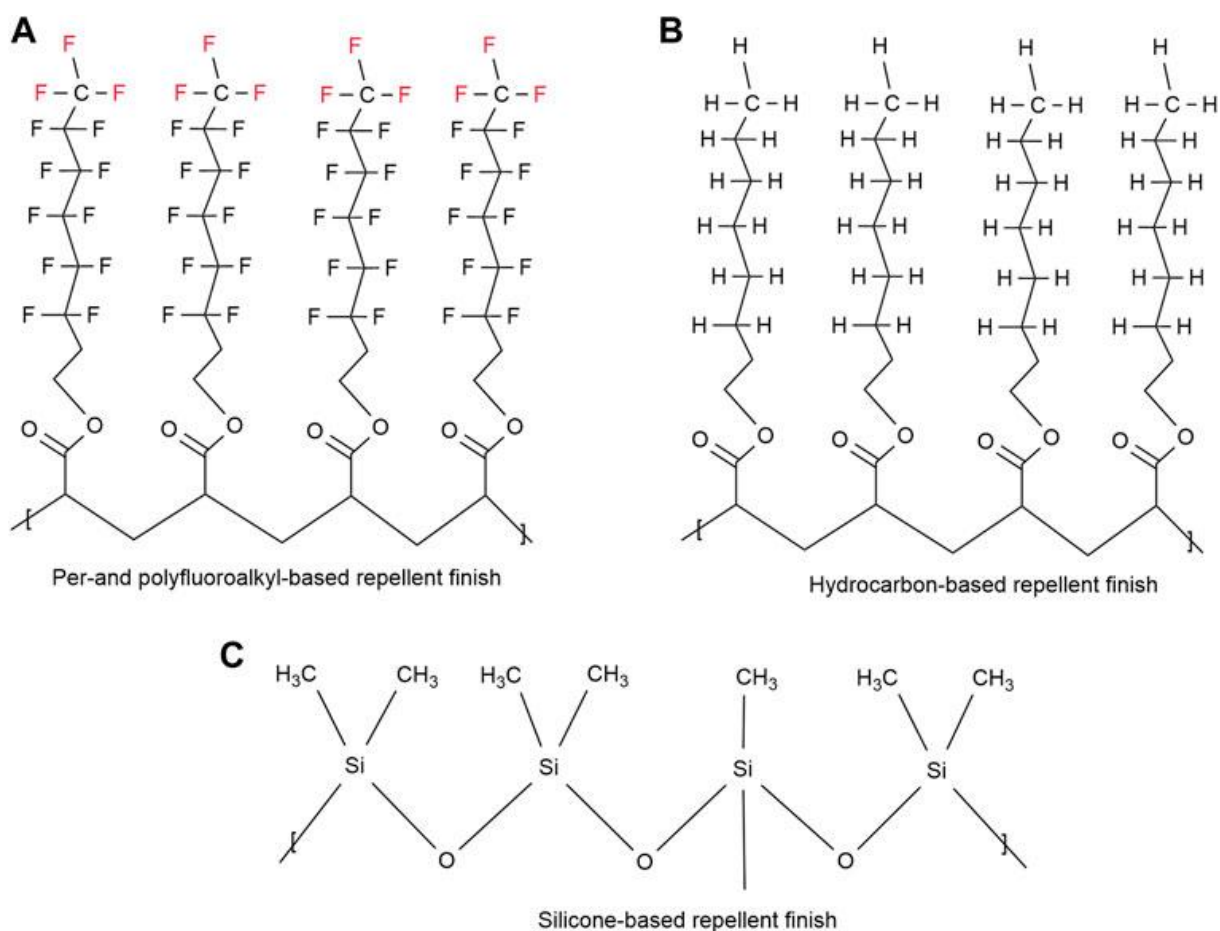


FIGURE 3. Wettability and contact angle of a substrate.

Fluorowane związki wykazują doskonałe właściwości termiczne i chemiczne, szczególnie ważne dla trwałości przed czyszczeniem i pielęgnacji produktu, takiego jak pranie, suszenie itp. Ponadto znaczne zmniejszenie właściwości napięcia powierzchniowego fluorowanych związków jest niezbędne do zaklasyfikowania jako odstraszające wodę lub olej (Sayed i Dabhi, 2014). Krytyczne napięcie powierzchniowe tekstyliów impregnowanych polimerami akrylowymi szybko maleje wraz ze wzrostem długości łańcucha, osiągając minimalną wartość napięcia powierzchniowego przy łańcuchu dziewięciowęglowym $-(CH_2)_8-CF_3$ (Audenaert i in., 1999). Wraz ze znacznym spadkiem napięcia powierzchniowego, odpuchowaczność wody i oleju znacznie wzrasta (Guo i in., 2008; Sayed i Dabhi, 2014; Gargoubi i in., 2020). W związku z tym stopniowe wydłużenie łańcucha fluorowanego z 1 do 9 zwiększa odporność materiału na wodę i olej (Sayed i Dabhi, 2014).

Większość trwałych odstraszających wodę (DWR) zazwyczaj posiada hydrofobowe lub oleofobiczne łańcuchy boczne, które są połączone z polimerem szkieletowym (Holmquist i in., 2016). Te łańcuchy boczne opierają się na silikonach, węglowodorach lub częściach per- i polifluoroalkilowych (Rysunek 4) (Dechant, 1985; Kissa, 2001; Holmquist i in., 2016). Te grupy odstraszaczy muszą być ściśle upakowane i ukierunkowane, aby osiągnąć właściwości odstraszających. Najlepsze właściwości odstraszaalne na wodę i olej wynikają z fluorowanych polimerów łańcuchów bocznych, ponieważ mają one najniższą krytyczną energię powierzchniową (Fox i Zisman, 1950). Łańcuchy boczne na bazie silikonu i węglowodorów zapewniają doskonałą odporność na wodę, ale nie mają zdolności do skutecznego odpychania większości olejów. Ponieważ wszystkie wykończenia DWR działają zgodnie z tymi zasadami, im gęstsze te grupy są upakowane, tym większa hydrofobowość powstanie (Wang i in., 1997). Każda zmiana konformacji powodowałaby mniej grup hydrofobowych na powierzchni tkaniny, a tym samym mniejszą wodoodporność (Holmquist i in., 2016). Dodatkowo wymagana jest odpowiednia długość łańcucha hydrofobowego, aby chronić tkaninę przed polarnymi kroplami wody (Honda i in., 2005; Woda, 2012).

FIGURE 4



RYSUNEK 4. Przykłady strukturalne **(A)** polimeru fluorowanego łańcucha bocznego, **(B)** odpychającego powłoki na bazie węglowodorów, **(C)** silikonu.

Fluoropolimery łańcuchowe boczne to forma PFAS stosowana na zewnętrznej obudowie sprzętu strażackiego, głównie w celu zapewnienia trwałej odporności na wodę i olej ([Holmquist i in., 2016](#); [Henry i in., 2018](#); [Peaslee i in., 2020](#)). Dlatego materiał zewnętrznej powłoki kurtek i spodni wycieczkowych oraz innych powierzchni tkanin w kapturach, rękawicach lub butach, które wykazują odporność na wodę i olej, tradycyjnie zawierały jakąś formę fluorowanych akrylowych polimerów łańcuchów bocznych, które mogą być wbudowane w tkaninę lub nakładane po tkaniu ([Holmquist i in., 2016](#); [Peaslee i in., 2020](#)). Chociaż mechanizmy zwrotnicze były zazwyczaj traktowane chemikami fluoropolimerów łańcucha bocznego, wiele badań wykazało obecność niepolimerowych PFAS na materiałach tekstylnych ([Gremmel i in., 2016](#); [Schellenberger i in., 2018](#); [Peaslee i in., 2020](#); [Liagkouridis i in., 2021](#); [Muensterman i in., 2021](#); [van der Veen i in., 2022](#)). Poprzednie badanie wykazało, że rozkład polimerowych PFAS łańcuchów bocznych może uwalniać niepolimerowe PFAS ([Washington i in., 2015](#)). Fluorowane polimery boczne, impregnowane trwałymi odstraszającymi wodę i olej, mogą uwalniać kwasy karboksylowe perfluoroalkilowe (PFCA) oraz alkoholy fluorotelomerowe (FTOH) ([Posner, 2012](#); [Gremmel i in., 2016](#)). Dodatkowo badanie wykazało dwa acyklany; akrylany fluorotelomerów (FTAC) w 28% oraz metakrylan fluorotelomerów (FTMAC) w 58% próbek powietrza ($n = 57$) ([Winkens i in., 2017](#)). Te lotne PFAS mogą potencjalnie być niezreagującymi monomerami pozostałościowymi z różnych polimerów fluorowanych łańcuchów bocznych ([Russell i in., 2008](#)). W związku z tym degradacja wykończenia i powierzchni tekstyliów PFAS spowodowana światłem ultrafioletowym, praniem i ekspozycją na wysokie temperatury może

uwalniać małe lotne cząsteczki PFAS oraz kurz i kłaczki tkanin, a następnie stanowić źródło ekspozycji na PFAS poprzez wdychanie, spożycie i kontakt z skórą ([Peaslee i in., 2020](#)). Na przykład PFOA jest produktem końcowej degradacji polimeru fluorowanego łańcucha bocznego na bazie C8, który jest znaną substancją trwałą, bioakumulującą i toksyczną. Podobnie alternatywne łańcuchy boczne fluorowane polimery DWR, takie jak PFHxA (fluorotelomer na bazie C6) i PFBS (fluorotelomer na bazie C4), są równie trwałe w środowisku. Szacowane okresy półtrwania eliminacji dla wybranych substancji perfluoroalkilowych podano w [Tabela 2](#) ([Substancje i Rejestr, 2021](#)).

TABLE 2

Perfluoroalkyls	Estimated elimination half-lives
PFOA	2.-10.1 years
PFOS	3.3–27 years
PFHxS	4.7–35 years
PFNA	2.5–4.3 years
PFBS	665 h
PFBA	72–81 h

TABELA 2. Szacowane okresy półtrwania eliminacji.

Badania wykazały znaczne ilości PFAS we wszystkich warstwach urządzeń zwrotniczej, w tym w termicznej okładce ([Rewerts i in., 2018](#); [Peaslee i in., 2020](#); [Shinde i Ormond, 2021](#)). Chociaż większość termicznych wkładek nie jest celowo impregnowana chemikaliami na bazie PFAS, badania wykazały znaczne ilości fluoru we wszystkich testowanych termicznych wkładkach ([Peaslee i in., 2020](#); [Muensterman i in., 2021](#)). Niektórzy badacze sugerowali, że to odkrycie sugeruje migrację PFAS z warstwy tkaniny impregnowanej do nieprzetworzonej warstwy ubrania, która może mieć bezpośredni kontakt ze skórą ([Peaslee i in., 2020](#)). [Peaslee i in. \(2020\)](#) stwierdzono, że większość zidentyfikowanych PFAS to krótkołańcuchowe i długołańcuchowe kwasy fluoroalkilowe, w tym PFOA. Choć to może być możliwe, innym możliwym wyjaśnieniem jest to, że PFAS w środowisku dymowym na miejscu pożaru mogą łatwo przeniknąć do sprzętu zwrotnego na styku kołnierza lub talii, ponieważ te zestawy nie chronią przed parą. Trzecią możliwą drogą skażenia wewnętrznej termicznej powłoki PFAS może być proces mycia sprzętu. W takim przypadku PFAS mogą pochodzić ze źródła wody, z zanieczyszczonego ekstraktora pralki lub z zanieczyszczenia tkanin barierowych z miejsca pożaru. Podczas mycia zewnętrzna powłoka sprzętu jest oddzielana od bariery przeciwwilgociowej i termicznej powłoki i myta osobno, więc jest mniej prawdopodobne, że wolne powłoki PFAS z zewnętrznej powłoki przedostaną się podczas prania.

[Muensterman i in. \(2021\)](#) oceniono zarówno lotne, jak i nielotne substancje PFAS w nowym wyposażeniu do wylotów. Badanie wykazało wyższe ilości lotnych PFAS niż nielotnych PFAS

we wszystkich warstwach sprzętu zwrotniczego. Największą ilość zarówno lotnych, jak i nielotnych PFAS znaleziono w barierze przeciwwilgociowej, następnie w zewnętrznej powłoce i termicznej powłoki dla lotnych PFAS oraz termicznej i zewnętrznej powłoki dla nielotnych PFAS ([Muensterman i in., 2021](#)). Dłuższe łańcuchy fluorotelomerowych alkoholów (FTOH), w tym 6:2, 8:2, 10:2 i 12:2, były mierzone w zębatkach wyprodukowanych w 2003 roku, co sugeruje stosowanie chemii C8 w tamtym czasie. Jednak w nowym osprzęcie zwrotniczym wykryto krótsze 6:2 FTOH, co może odzwierciedlać przejście z chemii C8 na C6 na początku lat 2000. (2005–2015) ([Muensterman i in., 2021](#)). Badania sugerują, że znaczne ilości PFAS mogą być uwalniane z fluorowanych tekstyliów używanych w PPE dla strażaków podczas służby odzieży ([Peaslee i in., 2020](#); [Muensterman i in., 2021](#)). Materiał prekursorowy PFOA może wypłukiwać z polimeru fluorowanego łańcucha bocznego, co może stanowić drogę narażenia użytkowników sprzętu zwrotnego ([Peaslee i in., 2020](#)).

Ze względu na niepożądane toksykologiczne i środowiskowe zachowania polimerów fluorowanych o długich łańcuchach bocznych, przemysł stara się przejść na alternatywne chemikalia, takie jak polimery fluorowane z łańcuchem skróconym łańcuchem oraz trwałe wykończenia odstraszające wodę bez fluoru ([Hill i in., 2017](#); [Schellenberger i in., 2018](#); [van der Veen i in., 2022](#)). W ramach alternatywnej analizy chemicznej, [Schellenberger i in. \(2018\)](#) oraz [Hill i in. \(2017\)](#) oceniono wydajność i trwałość dostępnych fluorowanych, i niefluorowanych, trwałych wykończeń odbojnych na tkaninach poliestrowych i poliamidowych, które zwykle są stosowane w odzieży sportowej. [van der Veen i in. \(2022\)](#) oceniono uwalnianie chemikaliów PFAS z fluorowanego DWR na bazie C8 i C6 na tkaninach poliestrowych i poliamidowych. Jak przewidywano, trwałe wykończenia wodoodporne na bazie C8 wykazywały najwyższą odporność na wodę i najwyższy kąt kontaktu, następnie DWR na bazie C6 i C4 ([Hill i in., 2017](#); [Schellenberger i in., 2018](#)). DWR na bazie węglowodorów i silikonu wykazywały zadowalającą odporność na wodę, jednak ich odstraszanie i trwałość nie były spójne, by uczynić je alternatywą dla fluorowanego DWR ([Hill i in., 2017](#); [Schellenberger i in., 2018](#)). Tylko DWR na bazie fluoru wykazywał odporność na oleje, która była najwyższa dla DWR na bazie C8 i zmniejszała się przy krótszej długości łańcucha ([Hill i in., 2017](#); [Schellenberger i in., 2018](#)). Podobne wzorce zaobserwowano pod względem trwałości i długości łańcucha fluorowanego DWR, a spadek wodoodporności zaobserwowano wraz ze skracaniem długości łańcucha z 8 do 6 węgli. Ponadto wraz ze starzeniem się z DWR opartym na C6 i C8 wzrastała forma dłuższych łańcuchów perfluoroalkilowych ([van der Veen i in., 2022](#)). Jednak DWR bez fluoru wykazał się dobrą trwałością i był porównywalny pod względem trwałości oraz wodoodporności do najlepszego fluorowanego DWR ([Schellenberger i in., 2018](#)). DWR na bazie C4 niemal całkowicie straciła odstraszacz oleju, podczas gdy na bazie C8 wykazała silny spadek po 10 cyklach prania ([Schellenberger i in., 2018](#)).

4.1.2 Bariera przeciwwilgociowa

W tkaninach ochronnych bariera przeciwwilgociowa służy do zapewnienia oddychalnej bariery odpornej na wodę i wiele innych cieczy, jednak umożliwia przepływ pary wilgoci. W ten sposób użytkownik uzyskuje ochronę przed gorącą wodą i innymi toksycznymi cieczami, jednocześnie utrzymując równowagę cieplną poprzez odparowywanie opar potu w wysokich temperaturach ([Song and Lu, 2013](#); [Shaid i in., 2018](#)). Bariery wilgoci to membrana hydrofobowa, powłoka lub błona mikroporowata ([Holmes, 2000](#)). Zazwyczaj bariera przeciwwilgociowa składa się z dwuwarstwowej błony; ognioodporna tkanina tkana lub nietkana jest przyklejana do

porowatej folii polimerowej. Folia polimerowa jest zazwyczaj zbudowana z poliestru, poliuretanu lub rozszerzonego politetylonu (ePTFE). Chociaż wszystkie trzy polimery mogą radzić sobie podobnie w zarządzaniu wilgocią, ePTFE przewyższa pozostałe dwa pod względem właściwości ochronnych termicznych i oddychalności. Powłoki poliestrowe i poliuretanowe zaczynają się rozkładać w około 150°C, a topnieją w 170°C–180°C. Dla porównania, membrana ePTFE wykazuje wysoki poziom wydajności tkanin zewnętrznych, które mogą wytrzymać temperaturę do 350°C. Dlatego większość komercyjnie dostępnych barier przeciwwilgociowych pokryta jest powłoką ePTFE. Ponadto właściwości przenikania przez parę wilgoci przez membranę ePTFE są powodem, dla którego te membrany są powszechnie stosowane w porównaniu do membran poliestrowych i poliuretanowych. W środowisku o wysokim upale ta dodatkowa przewiewność jest kluczowa, by ograniczyć stres cieplny i zmniejszyć obciążenie cieplne.

Jak już wspomniano, PTFE to forma PFAS, która może być potencjalnym źródłem ekspozycji na PFAS ([Peaslee i in., 2020](#)). Narażenie może nastąpić w wyniku degradacji PFAS i być wdychane lub przenikać przez skórę ([Peaslee i in., 2020](#)). Badania wykazały, że stosowane PFAS na materiałach tekstylnych degradują się z czasem pod wpływem ciepła, światła słonecznego i ekspozycji na wodę ([van der Veen i in., 2020](#)). Niedawne badanie wykazało, że bariery wilgoci zawierają większe ilości lotnych i nielotnych PFAS w porównaniu do zewnętrznych warstw i termicznych powłok ([Muensterman i in., 2021](#)). To samo badanie wykazało również całkowity fluor we wszystkich warstwach, mierzony za pomocą technik emisji gamma indukowanej przez cząstki (PIGE) oraz instrumentalnej analizy aktywacji neutronów (INAA). Obie techniki dawały najwyższą całkowitą wartość fluoru w barierze przeciwwilgociowej w porównaniu do warstwy zewnętrznej i termicznej ([Muensterman i in., 2021](#)). Chociaż [Peaslee i in. \(2020\)](#) wykryło PFAS w każdej warstwie sprzętu zwrotnego, nie udało się określić ilości fluoru na barierze wilgoci, ponieważ przekraczała ona granicę wykrywania w (PIGE). Badania wykazały bardzo wysokie stężenie fluoru w barierze wilgoci, przypisywane fluoropolimerowi PTFE ([Peaslee i in., 2020](#); [Muensterman i in., 2021](#)). Obecność PFOA w najnowszej barierze wilgoci (wyprodukowanej po 2012 roku) obniżyła PFOA powyżej minimalnego poziomu wykrywania, co może wynikać z przejścia z długołańcuchowych rozpuszczalników PFAS podczas produkcji PTFE ([Peaslee i in., 2020](#)).

PTFE należy do podgrupy fluoropolimerowych PFAS. [Henry i in. \(2018\)](#) zasugerował, że fluoropolimery powinny być traktowane jako polimery o niskim stopniu troski, definiowane przez OECD jako polimery mające nieistotny wpływ na zdrowie ludzi i środowisko ([OECD, 2009](#)). Jednak amerykańska Agencja Ochrony Środowiska (EPA) uznała obecnie polimery fluorowane łańcuchami bocznymi za polimery o niskim stopniu troski, biorąc pod uwagę ryzyko związane z polimerowymi PFAS, ale nie działała na fluoropolimery w sposób naturalny ([EPA, 2010](#)). [Lohmann i in. \(2020\)](#) klasyfikował produkty PFAS jako substancje, produkty fluoropolimerowe oraz gotowe wyroby wyrobowe. PTFE jest przykładem substancji, której struktura chemiczna jest znana, natomiast produkt komercyjny to faktycznie dostępny na rynku produkt sprzedawany przez różnych producentów, który może zawierać zanieczyszczenia pochodzące z produkcji. Bariera przeciwwilgociowa ePTFE stosowana w sprzęcie strażaków jest przykładem gotowego produktu, który jest wytwarzany z produktów ([Lohmann i in., 2020](#)). Chociaż nie ma wystarczających dowodów, by uzasadnić utrzymanie fluoropolimerów w tej samej toksycznej grupie co niepolimerowe PFAS, emisja PFAS o niskiej masie cząsteczkowej,

wykorzystywanych jako środki pomocnicze do przetwarzania polimerów podczas produkcji niektórych rodzajów fluoropolimerów, nadal może powodować istotne skutki zdrowotne i środowiskowe ([Henry i in., 2018](#); [Hopkins i in., 2018](#); [Brandsma i in., 2019](#); [Lohmann i in., 2020](#)). Zatem [Lohmann i in. \(2020\)](#) zasugerował, że fluoropolimer nie powinien być traktowany jako polimer o niskim stopniu troski.

4.2 Wodne pianki formujące film

Pożary z udziałem węglowodorów i innych łatwopalnych cieczy są pożarami klasy B ([Laitinen i in., 2014](#)). Ponieważ woda jest gęstsza niż paliwa węglowodorowe w ciekłym stanie, trafia do dolnej warstwy płonącej powierzchni węglowodorów i staje się nieskuteczna w gaszeniu pożaru ([Korzeniowski i in., 2018](#)). Ponadto temperatura spalania w większości miejsc pożaru ($\geq 175^{\circ}\text{C}$) jest znacznie wyższa niż temperatura wrzenia wody (100°C), co powoduje parowanie wody i powstawanie pary. Może to powodować oparzenia i szybko rozprzestrzeniać ogień ([Korzeniowski i in., 2018](#)). Dlatego do gaszenia tej klasy pożarów stosuje się wodne pianki formujące film (AFFF), które mają doskonałą stabilność termiczną i są zdolne do tworzenia warstwy opartej na paliwie. Typowymi składnikami wodnej pianki tworzącej film są woda, rozpuszczalniki organiczne, substancje powierzchniowo czynne, fluorosurfaktanty, polimery i inne dodatki ([Peshoria i in., 2020](#)). AFFF został opracowany w latach 60. XX wieku i od tamtej pory jest wykorzystywany do gaszenia pożarów klasy B ([Darwin i in., 1995](#)). Znaczną poprawę AFFF osiągnięto w latach 70. dzięki produkcji pianki na bazie fluorosurfaktantów. Kwasy perfluorowane oraz sole ośmiu atomów węgla oraz inne fluorowane związki były stosowane głównie w piankach formujących film ([Kissa, 1994](#); [Kissa, 2001](#)). Naval Research Laboratory i 3M rozpoczęły prace nad AFFF zawierającym fluorosurfaktanty oparte na chemii elektrochemicznej fluoracji (ECF) na początku lat 60., co doprowadziło do opracowania AFFF "Lightwater" firmy 3M ([Gipe i Peterson, 1972](#)). ECF i fluorotelomer to dwie chemie używane do syntezy fluorosurfaktantów. Perfluoroalkilosulfonian (PFSA) (np. perfluorooktanowy siarczanian [PFOS], $\text{C}_8\text{F}_{17}\text{SO}_3^-$) oraz kwasy karboksylowe perfluoroalkilowe (PFCAs) (np. kwas perfluorooktanowy [PFOA], $\text{C}_7\text{F}_{15}\text{COOH}$) były pierwszymi komercyjnie dostępnymi fluorosurfaktantami, które były produkowane metodą ECF ([Taylor, 1999](#); [Kissa, 2001](#); [Pabon i Korpart, 2002](#); [Buck i in., 2012](#); [Kempisty i in., 2016](#); [Korzeniowski i in., 2018](#)).

Silne wiązania węgla-fluoru w powierzchniowo czynnych substancjach przyczyniają się do wysokiej wydajności AFFF (np. odporności na kwas, zasady, utlenianie i redukcję) nawet w wysokiej temperaturze. Te powierzchniowo czynne czynniki odgrywają unikalną rolę w redukcji napięcia powierzchniowego AFFF ([Kissa, 1994](#); [Kissa, 2001](#); [Porter, 2013](#)). "Powierzchniowo aktywne" właściwości tych fluorosurfaktantów wynikają z polarnej głowicy hydrofilowej i długiego, niepolarnego ogona fluorowęglowodorowego ([Moody i Field, 2000](#); [Buck i in., 2012](#); [Baduel i in., 2017](#)). Unikalna właściwość fluorosurfaktantów sprawiła, że stały się niemal niezastąpione w wielu unikalnych zastosowaniach przemysłowych, w tym gaszeniu pożarów klasy B ([Jochyms i in., 2015](#)). Piany gaśnicze są jednym z powodów powszechnej obecności PFOS i PFOA, znanych również jako fluorocynyne o długim łańcuchu, w środowisku. Znaczący wzrost stosowania fluorosurfaktantów spowodował wzrost świadomości na temat negatywnego wpływu AFFF na zdrowie ludzi i środowisko ([Bursian i in., 2020](#)). Te chemikalia są bioakumulacyjne u ludzi i dzikich zwierząt, a trwałe w środowisku dzięki silnemu wiązaniu węgla-fluor. Wyładowania tych fluorosurfaktantów o długich łańcuchach są przedmiotem obaw badaczy na całym świecie ([Lau i in., 2007](#); [Post i in., 2012](#)).

Niebiodegradowalne fluorosurfaktanty stosowane w AFFF mają długą żywotność w środowisku. Istnieje chęć znalezienia alternatyw dla fluorosurfaktantów ze względu na ich trwały charakter ([Wang i in., 2018](#)). Zazwyczaj substancje degradują się lub stają się unieruchomione po uwolnieniu do środowiska, ale substancje perfluorowane nie doświadczają żadnego z tych elementów. Dlatego te substancje są wysoce rozpuszczalne, przenosalne i bioakumulacyjne ([Peshoria i in., 2020](#)). Bioakumulacja zachodzi, gdy substancje wykazują powinowactwo do składników biologicznych, takich jak tłuszcz i białko, i są magazynowane w obszarach tłuszczowych ([Liu i in., 2011](#)). Fluorosurfaktanty długołańcuchowe, stosowane w tradycyjnej pianie gaśniczej, zostały uznane za swoje powiązanie z białkiem wątroby, nerek i krwi ([Pizzurro i in., 2019](#)). Fluorosurfaktanty zostały zidentyfikowane jako główny składnik AFFF powodujący ich negatywne skutki środowiskowe ([Høisæter i in., 2019](#)).

Różne PFAS, takie jak kwas perfluorooktanowy lub jego sól, kwas perfluoroktansulfonowy lub jego sól oraz kwas perfluoroheksansulfonowy zostały wykryte we krwi, surowicy ludzkiej i mleku ([Calafat Antonia i in., 2007](#); [von Ehrenstein i in., 2009](#); [Gützkow i in., 2012](#)). Badania nad kwasami perfluoroalkilowymi (PFAA), w tym PFOS i PFOA, wykazały, że związki te mogą wpływać na cholesterol całkowity i LDL oraz są powiązane z rakiem piersi ([Steenland i in., 2009](#); [Nelson i in., 2010](#); [Bonefeld-Jorgensen i in., 2011](#)). Badanie przeprowadzone przez [Shaw i in. \(2013\)](#) Stwierdzono, że ekspozycja strażaków na ognioodporne chemikalia, takie jak polichlorowane i polibromowane dibenzo-p-dioksyny oraz dibenzofurany, wywołuje podobne efekty.

Eliminacja fluorosurfaktantów długich łańcuchów, przy jednoczesnym zachowaniu unikalnych i cennych właściwości fluorosurfaktantów, skłoniła producentów do opracowania alternatyw krótkołańcuchowych ([Peshoria i in., 2020](#)). Badania wykazały, że alternatywy krótkołańcuchowe mają mniejszy wpływ na środowisko i zdrowie człowieka w porównaniu do chemii długołańcuchowej ([El Corporation, 2014](#); [Buck, 2015](#)). Jednak wciąż istnieją kontrowersje, czy PFAS o krótkich łańcuchach mają mniejszy wpływ na środowisko i zdrowie ludzi w porównaniu do PFAS o długim łańcuchu. Niektóre źródła twierdzą, że PFAS krótkołańcuchowe są lepsze, inne nie. Długości łańcuchów węgla większe lub równe sześciu w rodzinie perfluoroalkanowych sulfonianów ($C_nF_{2n+1}SO_3(H)$) (PFSA) są uznawane za długie łańcuchy. Jednak w rodzinie kwasu perfluorokarboksylowego ($C_{x-1}F_{2x-1}COOH$) (PFCA) długości łańcuchów węglowych większe lub równe ośmiu są uznawane za długie łańcuchy ([Kempisty i in., 2016](#); [Korzeniowski i in., 2018](#)). Wynika to ze znaczących różnic w toksyczności i właściwościach bioakumulacyjnych między tymi dwoma rodzinami ([Gannon i in., 2011](#)).

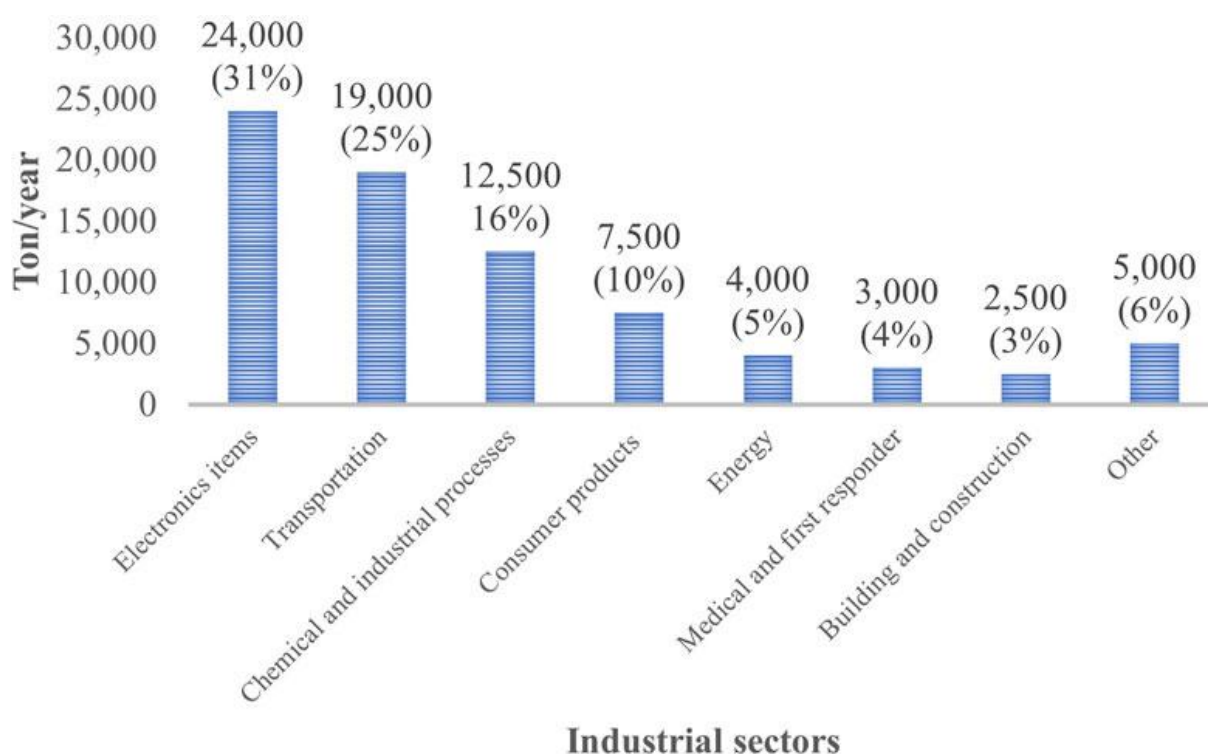
Badanie wykazało podwyższone poziomy kwasu perfluoroheksanowego (PFHxA) i kwasu perfluorooktanowego (PFNA) w surowicy krwi strażaków po sesji szkoleniowej, podczas której byli narażeni na AFFF ([Laitinen i in., 2014](#)). Jednak te podwyższone PFAS nie były głównymi elementami AFFF. Postawiono hipotezę, że fluorotelomery o długim łańcuchu uległy rozkładowi podczas pożaru paliwa lotniczego ([Laitinen i in., 2014](#)). Narażenie strażaków na PFAS z AFFF może mieć miejsce poprzez wdych i drogi skórne. Spożycie jest możliwe poprzez transfer z ręki do doustnej z skażonego sprzętu zwrotniczego po tłumieniu lub szkoleniu ([Laitinen i in., 2014](#)).

4.3 Scena pożaru

Badania wykazały, że ryzyko narażenia na PFAS jest wyższe dla strażaków niż u ogółu społeczeństwa ([Laitinen i in., 2014](#); [Grandjean i Clapp, 2015](#); [Rotander i in., 2015](#); [Mastrantonio](#)

i in., 2018; Peaslee i in., 2020). Choć stosowanie PFOA i PFOS zostało w dużej mierze zaprzestane w ciągu ostatnich 15 lat, związki te były powszechnie stosowane w meblach, dywanach, papierze lub wyrobach przemysłowych (Beecher i Brown, 2018; Mazumder i Islam, 2021). Wiele produktów zawierających te związki jest nadal dostępnych w naszym codziennym życiu. PFAS są obecnie stosowane także w kilku zastosowaniach, w tym w branży odzieżowej, półprzewodników i farmaceutyków (Rysunek 5) (Rizzuto, 2020). Największa ilość PFAS w USA jest stosowana w elektronice. PFAS stosuje się w produktach elektronicznych, takich jak przewody, kable, wyświetlacze ciekłokrystaliczne lub płaskie. Urządzenia elektroniczne używane jako urządzenia testujące, takie jak czujniki i płyny do wymiany ciepła, również muszą stosować PFAS jako fluorowane związki, co znacząco poprawia zastosowania tych urządzeń (Glüge i in., 2020; Tansel, 2022).

FIGURE 5



RYSUNEK 5. Wykorzystanie fluoropolimerów (w tonach) przez amerykańskie sektory przemysłowe w 2018 roku (Kempisty i Racz, 2021).

PFOA i PFOS mogą powstawać z produktów zawierających PFAS w wyniku rozpadu związków prekursorowych. Podczas pożaru związki PFAS (zarówno polimerowe, jak i niepolimerowe) mogą rozkładać się do związków prekursorowych, takich jak alkohole fluorotelomerowe, które z kolei mogą dalej degradować do końcowych form PFOA, PFOS lub innych związków fluorowanych i być uwalniane do środowiska. Strażacy oraz ratownicy na miejscu pożaru są narażeni na te związki podczas działań ratowniczo-gaśniczych oraz w trakcie scenariuszy szkoleniowych.

Tao i in. (2008) badali obecność związków perfluorowanych w próbkach osocza krwi ratowników narażonych na pył i dym powstały po zawaleniu się budynków World Trade Center (WTC). Stężenia PFOA i perfluoroheksanosulfonianu (PFHxS) w osoczu ratowników były ponad

dwukrotnie wyższe w porównaniu z populacją ogólną (Tao i in., 2008). Potencjalnym źródłem związków perfluorowanych, takich jak PFOS i PFOA, uwalnianych na miejscu zdarzenia i w jego pobliżu po katastrofie, mogły być piany gaśnicze, meble lub inne materiały użyte wewnątrz budynków. Wyniki tych badań sugerują, że większa ekspozycja na dym i pył może powodować wysokie stężenia związków fluorowanych w organizmach ratowników. Stwierdzono również, że narażenie na dym miało większy udział w podwyższeniu stężenia PFOA i PFHxS niż narażenie na pył. Podobnie jak w przypadku incydentu w WTC, strażacy pełnią służbę podczas licznych pożarów strukturalnych, narażając się na wysokie stężenia toksycznych chemikaliów, w tym związków fluorowanych obecnych w dymie i pyłach powstałych w wyniku spalania rozdrobnionych materiałów budowlanych i wyposażenia.

Wcześniejsze badania wykazały, że różne związki lotne i półlotne mogą uwalniać się (odgazowywać) z powierzchni odzieży specjalnej przez określony czas, co budzi obawy dotyczące PFAS, gdy strażacy mają kontakt z pianą AFFF na miejscu pożaru lub z dymem generowanym przez produkty konsumenckie zawierające PFAS (Fent i in., 2015; Fent i in., 2017; Mayer i in., 2019). Jeśli PFAS powstałe na miejscu pożaru mogą adsorbować się na powierzchni ubrań specjalnych, to ekspozycja zostaje przeniesiona do miejsca, w którym sprzęt jest przechowywany w remizie. Dlatego konieczne są dalsze badania, aby sprawdzić, czy sprzęt skażony PFAS działa jako dodatkowe źródło obecności tych związków w pomieszczeniach strażnicy.

Według amerykańskiej EPA, dorośli i dzieci spożywają odpowiednio prawie 30 mg i 60–100 mg pyłu wewnętrznego dziennie ([Moya i in., 2011](#)). Dla ogółu społeczeństwa środowiska wewnętrzne, w tym kurz i powietrze, są uznawane za źródło ekspozycji PFAS lub organicznego fluoru ([De Silva i in., 2012](#)). Stężenia PFAS dla związków takich jak PFCA, PFSA, FTOH oraz perfluorooktylosulfonamidy (PFSA_m) są zgłaszane jako wyższe w powietrzu wewnątrz pomieszczenia niż na zewnątrz ([Shoeib i in., 2005](#); [Harad i in., 2010](#)). [Shoeib i in. \(2005\)](#) stwierdzono, że półlotny neutralny prekursor, PFSA_m, był 10–20 razy wyższy w powietrzu wewnątrz niż na zewnątrz. Podobny trend zaobserwowano w przypadku niektórych naturalnych prekursorów lotnych, takich jak PFSA i PFCA, gdy porównywano powietrze wewnętrzne i zewnętrzne ([Shoeib i in., 2011](#)). [Fraser i in. \(2012\)](#) zbadano powietrze wewnętrzne w 30 biurach i stwierdzono znacząco wysokie stężenia związków polifluorowanych (PFC) wewnątrz tych biur. Zaobserwowano również najwyższy poziom FTOH w najnowszym budynku oraz innych biurach i doszli do wniosku, że za to podwyższone stężenie odpowiada głównie odparowanie FTOH z nowych dywanów lub mebli z nowych budynków ([Fraser i in., 2012](#)).

Oprócz sprzętu do wyjazdów, strażacy przechowują także inne źródła PFAS, takie jak AFFF i tapicerowane meble, w remizach. Dzięki tym przedmiotom strażacy mogą wprowadzać do remizy resztki zanieczyszczenia PFAS, które mogą stanowić źródło PFAS poprzez zanieczyszczenie powietrza w pomieszczeniach lub uwalnianie pyłu podatnego na powietrze. Wcześniej pył był ważną drogą ekspozycji na ognioodporne chemikalia dla strażaków ([Jones-Otazo i in., 2005](#); [D'Hollander i in., 2010](#); [Stapleton i in., 2012](#); [Mazumder i Islam, 2021](#)). Dlatego konieczne było zbadanie roli powietrza i kurzu w pomieszczeniach jako potencjalnego źródła narażenia strażaków na PFAS. Najnowsze badania wykazały znacząco wysokie stężenia PFAS w pyłu z remii strażackich, co budzi niepokój dla strażaków, ponieważ większość zmiany spędzają w remizach ([Hall i in., 2020](#); [Young i in., 2021](#)). [Young i in. \(2021\)](#) przeanalizował próbki

pyłu z 15 remiz, celując w 24 PFAS. Mediana stężenia pyłu w tych 24 PFAS w remizach strażackich wyniosła 98,7 ng/g, z N-EtFOSAA, 6:2 FtS, PFDS, 8:2 FtS i PFOS jako głównymi składnikami. Docelowe 24 PFAS stanowią jedynie 1,2% całkowitej wykrytej masy fluoru, co wskazuje na obecność niezidentyfikowanych niepolimerowych i polimerowych PFAS w pyłe ([Robel i in., 2017](#); [Schultes i in., 2019](#)). Stwierdzono także wyższe stężenie fluoru z pyłu w szatniach w epoce zwrotniczej niż z pyłu zbieranego w salonach remiz. Ponieważ sprzęt rozjazdowy jest przechowywany w szatniach w niektórych stacjach (w innych w komorze silnikowej), pokazało to, że sprzęt rozrutowy może być głównym źródłem ekspozycji strażaków na PFAS.

Pył skażony PFAS może powstawać z zewnętrznego zanieczyszczenia podczas działań gaśniczych lub celowo dodawany PFAS do sprzętu. Pranie może również uwalniać część PFAS używanej w sprzęcie wyjazdowym, ponieważ stwierdzono, że podczas prania kurtek zewnętrznych mogą być uwalniane fluoropolimery tańcuchowe boczne z poszczególnych włókien ([Schellenberger i in., 2019](#)). Gdy włókna zawierające fluor uwalniają się w środowisku, szkielet fluorowanego polimeru może być z czasem rozszczepiany i tworzyć krótkotańcuchowe kwasy perfluoroalkilowe. Na razie uzyskano niewiele informacji na temat uwalniania związków PFAS używanych w zespołach strażarniczych w wyniku prania. Dlatego należy dalej badać wpływ prania na uwalnianie związków PFAS. [Hall i in. \(2020\)](#) zbadano próbki pyłu wewnętrznego pobrane z 49 remiz, zlokalizowanych zarówno w Stanach Zjednoczonych, jak i w Kanadzie, i stwierdzono, że najczęstszym wykrytym PFAS jest stosunek 6:2 FTOH (760 ng/g). Zbierali także kurz z domów w Karolinie Północnej i znaleźli znacząco wyższe stężenie PFOS, PFOA, PFHxS, PFNA oraz 6:2 diPAP w pyłu strażackim w porównaniu do pyłu mieszkaniowego. Mediana poziomu pyłu PFOS, PFHxS i 6:2 diPAP była odpowiednio 15, 3 i 2,5 razy wyższa w pyłu strażackim w porównaniu do pyłu domowego ([Hall i in., 2020](#)). Chociaż to odkrycie nie gwarantuje podobnych trendów w całym kraju, wskazuje na większą ekspozycję na PFAS wewnątrz remiz, niż na terenach mieszkalnych. Autorzy stwierdzili, że stężenie PFAS w pyłu w amerykańskich remizach strażackich jest znacząco wyższe w porównaniu z pyłem zbieranym w kanadyjskich remizach, choć przypuszczali, że różnice w okresie zbierania danych mogą być przyczyną tej różnicy ([Hall i in., 2020](#)). PFOS był głównie obecny w kurzu zbieranym z amerykańskich remiz strażackich.

PFAS zostały wykryte niemal na każdej warstwie sprzętu zwrotniczego, ponieważ PFAS stosuje się w osprzętach zwrotniczym, aby zapewnić stabilność cieplną i właściwości odporności na olej ([Peaslee i in., 2020](#)). [Young i in. \(2021\)](#) znaleźli PFAS na powierzchni sprzętu zwrotnego zebranego przez wycieczki sprzętowe. Najwyższa wykryta ilość PFAS wyniosła 84 500 ng/wytrzeć, podczas gdy ponad 50% całkowitej masy PFAS na chusteczkach do zębów stanowiły kwasy karboksylowe perfluoroalkilowe (PFCA). PFOA, PFHxA, PFDA, PFNA, PFHpA oraz 8:2 FtS były najczęściej wykrywanymi PFCA. Stężenie lotnych PFAS jest wyższe w sprzęcie zwrotnym niż w nielotnych PFAS ([Muensterman i in., 2021](#)). PFAS stosowane w sprzęcie mogą z czasem ulegać degradacji pod wpływem ciepła, wody i światła słonecznego, co wskazuje, że stosowane PFAS w strojach strażaków mogą również być wyrzucane do środowiska i stanowić źródło ekspozycji dla strażaków ([Rankin i in., 2014](#); [Rankin, 2015](#); [van der Veen i in., 2020](#)). [Peaslee i in. \(2020\)](#) w porównaniu między 10-letnimi nieużywanymi zespołami a zespołami używanymi przez 10 lat służby. Stwierdzili, że używane próbki straciły 80% całkowitego fluoru z powierzchni zewnętrznej powłoki w ciągu 10 lat od uruchomienia. Utrata

fluoru wskazuje, że PFAS prawdopodobnie wydziela się do środowiska zewnętrznego. Przeprowadzono także ekstrakcję metanolu z próbek pyłu pobranych z podłogi stanowiska roboczego zakładu przetwarzania środków ochrony osobistej oraz zaobserwowano n-Et-FOSAA. Analiza próbek pyłu wskazuje, że prawdopodobnie pochodził z zespołów PPE, a nie z AFFF, ponieważ w próbkach nie wykryto krótkich i długich fluorotelomerów, sulfonianów fluorotelomerów oraz fluoroalkilowych sulfonianów ([Place and Field, 2012](#); [Barzen-Hanson i in., 2017](#); [Peaslee i in., 2020](#)). Estery metakrylanu powstają z Et-FOSE, która pełni rolę polimeru szkieletu wykończeń tkanin, a Et-FOSE jest ostatecznie przekształcana w Et-FOSAA podczas rozkładu i hydrolizy ([Plumlee i in., 2009](#); [Benskin i in., 2013](#); [Liu i Avendaño, 2013](#); [Wang i in., 2014](#); [Washington i Jenkins, 2015](#)). Dlatego wykrycie Et-FOSAA w próbkach pyłu wskazuje, że łańcuchy boczne fluoropolimerów są już zdegradowane. Ponieważ Et-FOSE prawdopodobnie został utleniony do PFOA, produkty rozkładu z Et-FOSAA mogą ostatecznie narażać strażaków na materiały prekursorowe PFOA i dostać się do ich ciała ([Plumlee i in., 2009](#)).

5 ścieżek przyswajania

Trzy główne drogi ekspozycji to spożycie, wdychanie i wchłanianie przez skórę. PFAS jest znany z rozpowszechnienia w całym środowisku, więc wszystkie trzy trasy warto rozważyć ([Fraser i in., 2012](#); [Peaslee i in., 2020](#)). Spożycie jedzenia i napojów zostało zidentyfikowane jako główny sposób przyjmowania PFAS przez ogół społeczeństwa ([Poothong i in., 2020](#)). Na przykład AFFF i inne zanieczyszczenia środowiskowe rozprzestrzeniają się przez wody gruntowe i glebę z pobliskich miejsc ([Backe i in., 2013](#); [Houtz i in., 2013](#); [Dauchy i in., 2019](#)). PFAS może następnie gromadzić się w organizmie człowieka bezpośrednio z zanieczyszczonej wody lub poprzez pokarmy takie jak czerwone mięso, jajka, warzywa, przekąski, owoce morza, tłuszcze zwierzęce itp. ([Huang i in., 2020](#)).

Ponieważ spożywanie diety jest istotne dla ogółu społeczeństwa, strażacy również powinni się tym martwić ([Trudel i in., 2008](#); [Fromme i in., 2009](#); [Haug i in., 2011a](#); [Egeghy i Lorber, 2011](#)). Jedno z badań wskazało produkty uprawiane w remizie strażackiej jako główne źródło ekspozycji na PFAS ([Tefera i in., 2022](#)). Badanie wykazało, że spożywanie jajek produkowanych w remizach wydawało się być główną drogą ekspozycji na PFAS, następnie spożycie owoców i warzyw oraz kontakt skóry z powierzchniami zanieczyszczonymi kurzem. Na podstawie mediany i typowej ekspozycji, spożycie żywności stanowiło 82% całkowitego spożycia PFAS przez strażaków, następnie przypadkowe spożycie i ekspozycja skóry na PFAS w pyłu (15%). Przypadkowe połknięcie i wchłonięcie przez skórę PFAS z ziemi i czyszczenia naczyń skutkowały <1% ([Tefera i in., 2022](#)). Te wyniki szeroko wspierają badania wielu innych badań, w których spożycie żywności zostało zidentyfikowane jako najważniejsza droga narażenia na PFAS ([Haug i in., 2011a](#); [Haug i in., 2011b](#)). Szacowane spożycie PFAS w tym badaniu było znacznie wyższe niż wcześniejsze szacunki dotyczące spożycia diety w populacji ogólnej ([Chain i in., 2018](#)). Chociaż badanie koncentrowało się na strażakach zawodowych, drogi narażenia dietetyczne wskazane tutaj mają szersze znaczenie dla ogółu społeczeństwa, zwłaszcza dla tych, którzy spożywają żywność uprawianą na terenach lub w pobliżu zanieczyszczonych PFAS. To badanie jako pierwsze opisuje unikalną dietetyczną drogę ekspozycji na PFAS w kontekście zawodowych strażaków.

Ponadto, ze względu na działalność zawodową, ryzyko wchłaniania PFAS przez skórę i drogę oddechową jest znacząco wyższe dla strażaków. Na przykład PFAS używane w sprężeniu

zagładowym mogą przenosić się z wyposażenia na skórę strażaka. Innym specyficznym źródłem straży pożarnej jest kontakt z AFFF. Ponadto dym powstający z produktów konsumenckich zawierających PFAS może zanieczyszczać sprzęt i skórę oraz stanowić zagrożenie dla wdychania. Chociaż żadne badania nie potwierdzają źródeł PFAS na miejscu pożaru, PFAS jest nadal używany komercyjnie, więc powinien występować w sadzy lub dymie. Konieczne jest określenie likwidacji oraz ilości PFAS generowanych i uwalnianych podczas działań gaszących.

Z tych źródeł należy ograniczyć ścieżkę wdechową, zakładając prawidłowe i konsekwentne stosowanie samodzielnych aparatów oddechowych (SCBA). Jakikolwiek ulotnienia zanieczyszczeń pochodzących z dymu, AFFF lub samego sprzętu nie powinny być wdychane podczas stosowania SCBA podczas aktywnego tłumienia ognia. Jednak stosowanie SCBA przez każdego strażaka na miejscu pożaru przez cały czas trwania incydentu nie jest spójne w poszczególnych jednostkach ani w obrębie. Dowódcy incydentów i operatorzy pomp rzadko używają SCBA na miejscu, a strażacy podczas ataku wewnętrznego lub zewnętrznego mogą zdejmować maski podczas lub po dekontaminacji na miejscu, gdy są jeszcze w zasięgu dymu. To powszechne błędne przekonanie doprowadziło do niewielu badań badających wpływ wdychania na PFAS na miejscu pożaru. Poza ścieżką wdechową, najprawdopodobniej kolejnym głównym szlakiem wchłaniania jest wchłanianie przez skórę. Wcześniejsze badania wykazały, że zanieczyszczenia chemiczne mogą przenosić się z tkanin na skórę ([Blum i in., 1978](#); [Appel i in., 2008](#); [Rossbach i in., 2014](#)). Konieczne są badania, aby określić, w jakim stopniu PFAS może wydzielać gazy lub wypłukiwać z tkanin, a następnie przenosić się i wchłaniać do skóry.

PFOA to fluorochemiczny składnik wykryty we krwi większości Amerykanów w ciągu ostatniej dekady, choć stężenie zaczyna spadać. [Franko i in. \(2012\)](#) badano możliwość penetracji PFOA przez skórę ludzką przez skórę skórną. Stwierdzili, że PFOA może przenikać przez ludzką skórę, a dermalne wchłanianie fluorochemikaliów może być główną drogą narażenia na PFAS ([Franko i in., 2012](#)). Badanie wykazało, że PFOA przy pH 2,25 powoduje wzrost współczynnika przepuszczalności skóry o 3 rzędy wielkości w porównaniu do pH 5. Ta różnica pH wpływa na stan jonizacji PFOA, który ma pKa 3,8 ([Franko i in., 2012](#)). Poniżej wartości pKa PFOA jest w większości niejonizowana. Związki niejonizowane mają lepszą rozpuszczalność lipidową niż ich zjonizowane odpowiedniki i łatwiej przenikają do matrycy lipidowej skóry. pH skóry wynosi około 5,5, więc oczekuje się, że PFOA jest głównie zjonizowane w skórze. Chociaż ogólnie penetracja PFOA powinna być niska dla ludzkiej skóry, ponieważ większość ekspozycji odbywa się w stanie zjonizowanym ([Tabela 3](#)), nadal budzi to niepokój w przypadku wyższego poziomu ekspozycji.

TABLE 3

Un-ionized PFOA	Ionized PFOA

TABELA 3. Stany jonizacyjne kwasu perfluorooktanowego.

Metody *in vivo* zostały wykorzystane do analizy dermalnego wchłaniania i wpływu PFAS. [Abraham i Monien \(2022\)](#), martwił się wchłanianiem PFAS przez kosmetyki, dlatego

zmierzył ilość PFOA wchłanianego przez skórę z przygotowanego roztworu kremu z filtrem. Roztwór kremu z filtrem (stężenie ^{13}C -PFOA 3,7 $\mu\text{g/g}$) był bezpośrednio nakładany na całą powierzchnię ciała i pozostawiany do utrzymania na skórze przez 48 godzin przed kąpielą. Pobrano próbki krwi i analizowano osocze za pomocą UHPLC-MS/MS. Od pierwszego nałożenia kremu z filtrem wykryto wzrost PFOA przez pierwsze 10 dni, a następnie utrzymywał się na poziomie przez kolejne 110 dni pobierania. Naukowcy oszacowali, że 1,6% zastosowanej dawki PFOA zostało wchłonięte podczas ekspozycji. To badanie pomaga pokazać, że w tym kosmetycznym nośniku dawkowania PFOA może być wchłaniane skórnie i nie jest szybko metabolizowane ani wydalane. Badanie wykazało, że bromowane i chlorowane substancje chemiczne, które są strukturalnie spokrewnione z PFAS, są dermalnie biodostępne i mogą powodować znaczne obciążenia organizmu. Sugeruje to, że ekspozycja na skórę może być ważną ścieżką ekspozycji na PFAS, zwłaszcza w przypadku produktów konsumenckich związanych z kontaktem ze skórą (np. wodoodporne tkaniny, kosmetyki) ([Ragnarsdóttir i in., 2022](#)).

Inne badania *in vivo* koncentrowały się bardziej na toksykologicznych skutkach PFAS. [Franko i in. \(2012\)](#) Analizowałem ekspresję cytokin na skórze myszy i nie stwierdzono istotnej ekspresji w porównaniu do grupy kontrolnej. Stwierdzono, że narażenie skóry na PFBA i PFOA zwiększa masę wątroby i zmienia szlak PPAR u myszy ([Shane i in., 2020](#); [Weatherly i in., 2021](#)). [Han i in. \(2020\)](#) badano również wpływ narażenia skóry na kilka PFAS (PFOA, PFHpA, PFHxA i PFPeA) na skórę człowieka i nie stwierdzono istotnych efektów toksykologicznych. Badanie *in vivo* PFHpA wykazało martwicę rurkowokomórkową i wątrobowokomórkową oraz degradację komórek rozrodczych. Choć znajomość potencjalnych skutków jest ważna, w badaniu *in vivo* zastosowano dużą dawkę i wydaje się nierozsądna przy ekspozycji ludzi. [Fasano i in. \(2005\)](#) użyto skóry szczura i człowieka do badania penetracji PFOA w przypadku kontaktu skórniego. Stwierdzili, że PFOA może przenikać zarówno przez skórę człowieka, jak i szczura, choć tempo penetracji jest 34 razy wolniejsze w ludzkiej skórze niż u szczura. Potrzebne są dalsze dane dotyczące skórnych toksykologicznych skutków PFAS, mechanizmów działania oraz jego relacji z ludźmi. Ponadto nie przeprowadzono żadnych badań dotyczących dermalnego wchłaniania PFAS z nowego lub skażonego sprzętu do strefy pożarnej.

Badanie przeprowadzone na dzieciach wykazało, że spożycie pyłu może mieć wpływ zbliżony do przyjmowania związków perfluorowanych (PFC) wraz z dietą ([Egeghy i Lorber, 2011](#)). Udowodniono już, że PFAS występują w dużych stężeniach wewnątrz remiz strażackich ([Hall i in., 2020](#); [Young i in., 2021](#)). W związku z tym, obok najpowszechniej rozpoznawanych źródeł pokarmowych, takich jak żywność i woda, wdychanie pyłu oraz powietrza wewnątrz remiz stanowi dla strażaków główne źródło PFAS trafiających do organizmu drogą oddechową ([Sunderland i in., 2019](#); [Chain i in., 2020](#)).

Narażenie strażaków na PFAS może mieć również wpływ na ich dzieci. Oprócz potencjalnego przenoszenia PFAS do domów, związki te mogą być przekazywane wraz z mlekiem matki. Jeden z badaczy stwierdził silną korelację między wysokim stężeniem PFAS w surowicy matki a ich zawartością w mleku kobiecym ([Inoue i in., 2004](#)). Kobiety stanowią około 5,1% populacji strażaków, dlatego ich ekspozycja musi być brana pod uwagę ([Hulett i in., 2007](#); [Trowbridge i in., 2020](#)). Wskazuje to, że dzieci kobiet strażaków mogą być narażone na PFAS długotrwale i we wczesnym wieku poprzez łożysko lub laktację ([Inoue i in., 2004](#); [Gützkow i in., 2012](#); [Cariou](#)

i in., 2015; Chen i in., 2017). Może to zwiększać podatność dzieci na negatywne skutki zdrowotne (Inoue i in., 2004).

Young i in. (2021) zarekomendowali, aby – ze względu na to, że strażacy spędzają prawie 72% czasu podczas 24-godzinnej służby wewnątrz remizy – dążyć do minimalizacji obecności PFAS w stacjach. Próbkę powietrza wewnętrznego powinny być regularnie monitorowane w celu określenia poziomu ekspozycji na PFAS. Aby zminimalizować zarówno skórne, jak i oddechowe narażenie na cząsteczki PFAS, strażacy powinni konsekwentnie używać na miejscu pożaru pełnego wyposażenia ochronnego, w tym aparatów powietrznych (SCBA) i ubrań specjalnych. Niezbędne do ograniczenia ryzyka ekspozycji jest również noszenie pod ubraniem specjalnym odzieży wolnej od PFAS, przechowywanie sprzętu zawierającego PFAS oddzielnie od innych ubrań oraz mycie rąk po dotykaniu ubrań specjalnych (Young i in., 2021).⁶ PFAS in blood serum

Historycznie strażacy byli narażeni na szkodliwe substancje chemiczne pochodzące z dymu pożarowego oraz pian gaśniczych zawierających wysokie poziomy różnych WWA (wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych) i PFAS (Jalilian i in., 2019; Gasiorowski i in., 2022). Dodatkowo pojawiły się nowe obawy dotyczące narażenia strażaków na PFAS poprzez ubrania specjalne. W kilku badaniach zaobserwowano związek między ekspozycją na PFAS a szeregiem negatywnych skutków zdrowotnych (Graber i in., 2021). Chociaż PFAS są potencjalnie szkodliwe dla ludzkiego zdrowia, dokładny próg, przy którym to ryzyko wzrasta, pozostaje nieznany (Gasiorowski i in., 2022). Podobnie jak w przypadku innych substancji chemicznych, ich zdolność do wywoływania negatywnych skutków zdrowotnych zależy od okoliczności narażenia, takich jak wielkość dawki, czas trwania oraz droga ekspozycji (Fenton i in., 2021). Ponadto wiek danej osoby, płeć, pochodzenie etniczne, stan zdrowia i predyspozycje genetyczne również mogą wpływać na wystąpienie niekorzystnych skutków zdrowotnych (Fenton i in., 2021). Niemniej jednak kilka długołańcuchowych związków PFAS powiązano z ryzykiem wystąpienia nowotworów (Temkin i in., 2020). Wśród nich PFOA została sklasyfikowana przez Międzynarodową Agencję Badań nad Rakiem (IARC) jako substancja o możliwym działaniu rakotwórczym dla ludzi w odniesieniu do raka nerki i jądra (Rotander i in., 2015; IW Group, 2016).

Substancje per- i polifluoroalkilowe budzą szczególny niepokój ze względu na ich właściwości trwałe oraz zdolność do bioakumulacji (Li i in., 2018; Graber i in., 2021). Mogą one pozostawać w ludzkim organizmie przez długi czas w niezmienionej formie i zakłócać funkcje organizmu (Li i in., 2018). Kumulują się w organizmach poprzez wiązanie się z białkami osocza oraz sekwestrację w wątrobie, nerkach i płucach (Meegoda i in., 2020). Zdolność do wiązania się z białkami krwi, powolne wydalanie z moczem oraz niski poziom klirensu są wskaźnikami substancji o właściwościach bioakumulacyjnych i długim okresie półtrwania (Tonnelier i in., 2012). Długołańcuchowe PFAS, takie jak PFOS i PFOA, mają okres półtrwania wynoszący odpowiednio 5,4 oraz 3,8 lat (Li i in., 2018). Alternatywy dla PFOS, takie jak kwas perfluoroheksanosulfonowy (PFHxS), mają znacznie dłuższy okres półtrwania, wynoszący 8,5 roku (Li i in., 2018). Inne krótkołańcuchowe alternatywy, takie jak kwas perfluoropentanowy (PFPeA) i perfluorobutanosulfonian (PFBS), mają krótszy okres półtrwania, wynoszący kilka tygodni (Li i in., 2018). Chociaż PFOA i PFOS były szeroko badane, skutki zdrowotne ich alternatyw nie zostały przebadane tak dokładnie. Obecność tych alternatyw PFAS w ludzkim organizmie nadal budzi niepokój, mimo krótszego okresu półtrwania i niskiego poziomu stężeń. Ze względu na ich powszechne stosowanie i wszechobecność w środowisku, większość

Amerykanów ma tło ekspozycji na niektóre PFAS ([Graber i in., 2021](#)). Jednak narażenie strażaków może być związane zawodowo, ponieważ są oni narażeni na PFAS na różne sposoby, co zwiększa ich podatność. Najczęściej wykrywane PFAS wśród strażaków to PFOA (od 1,15 do 2,15 ng/mL), PFOS (od 4,11 do 8,63 ng/mL), PFHxS (od 1,83 do 6,15 ng/mL), PFNA (od 0,46 do 0,97 ng/mL), PFDA (od 0,25 do 0,31 ng/mL) oraz PFUnDA (od 0,11 do 0,18 ng/mL) ([Trowbridge i in., 2020](#); [Graber i in., 2021](#)). Strażacy z historią stosowania AFFF mają podwyższone poziomy PFOS i PFHxS w surowicy ([Rotander i in., 2015](#)). W tym zakresie kilka badań wykazało wyższe poziomy niektórych długołańcuchowych PFAS w surowicy wśród strażaków w porównaniu z ogólną populacją podobnych grup demograficznych ([Dobraca i in., 2015](#); [Rotander i in., 2015](#); [Leary i in., 2020](#); [Trowbridge i in., 2020](#); [Graber i in., 2021](#)) (Tabela 4). W tych badaniach jako przedstawicieli ogólnej populacji USA byli udzieleni uczestnikom National Health and Nutrition Examination Survey (NHANES). Badanie jest przeprowadzane przez Centers for Disease Control and Prevention (CDC) i publikowane w dwuletnim cyklu.

TABLE 4

	Rotander et al. (2015)	Dobraca et al. (2015)	Trowbridge et al. (2020)	Leary et al. (2020)	Graber et al. (2021)
Sample Year	2013	2010–2011	2014–2015	2018–2019	2019
Cohort Size	149	101	86	36	135
Region	Queensland, Australia	Southern California	San Francisco	Southwest Ohio	New Jersey
Compound					
Perfluoroheptanoic acid (PFHpA)	0.1	0.13 (±0.02)			
Perfluorooctanoic acid (PFOA)	4.6	3.75 (±0.38)	1.15 (±0.10)	2.15	2.07 (±0.18)
Perfluorononanoic acid (PFNA)	0.76	1.15 (±0.10)	0.67 (±0.06)	0.46	0.97 (±0.08)
Perfluorodecanoic acid (PFDA)	0.29	0.90 (±0.12)	0.25 (±0.02)		0.31 (±0.02)
Perfluoroundecanoic acid (PFUnDA)	0.16	0.24 (±0.03)	0.18 (±0.04)		0.11 (±0.01)
Perfluorododecanoic acid (PFDoA)	NC		NC		0.14 (±0.01)
Perfluorobutane sulfonic acid (PFBS)	NC	NC	0.13 (±0.03)		
Perfluorohexane sulfonic acid (PFHxS)	33	2.26 (±0.26)	3.79 (±0.55)	6.15	1.83 (±0.22)
Perfluorooctane sulfonic (PFOS)	74	12.5 (±1.16)	4.11 (±0.43)	8.63	4.25 (±0.55)
Perfluorooctane sulfonamide (PFOSA)		0.032 (±0.005)			
2-(N-methyl-PFOSA) acetic acid (MeFOSAA)		0.16 (±0.03)			0.08 (±0.01)
2-(N-ethyl-PFOSA) acetic acid (EtFOSAA)		0.016 (±0.002)			

NC—Not calculated due to low detections.

TABELA 4. Badanie stężenia PFAS w surowicy krwi strażaków (średnia geometryczna ng/mL ±95% CI).

Jedno z niedawnych badań przeprowadzonych wśród mężczyzn-ochotniczych strażaków z New Jersey wykazało, że średnie stężenia PFNA w surowicy (+53%), PFDA (+39%) i PFDoA (+50%) były istotnie wyższe niż w populacji NHANES ([Graber i in., 2021](#)). Inne badanie w regionie południowo-zachodniego Ohio wykazało wyższe stężenia PFOS w surowicy (+29%) i PFHxS (+74%) wśród strażaków podmiejskich niż wśród dorosłych mężczyzn w USA (dane NHANES 2015–2016) ([Leary i in., 2020](#)). Dla porównania, poziomy PFOS w surowicy (–43%) i MeFOSAA (–88%) były istotnie niższe niż w populacji ogólnej ([Graber i in., 2021](#)). Niższy poziom surowicy pokrywa się z wycofywaniem niektórych długołańcuchowych PFAS, w tym PFOA i PFOS, z

produktów konsumenckich i sprzętu gaśniczego ([Rotander i in., 2015](#)). Jednak oczekuje się, że te związki przetrwają wiele lat ze względu na długi okres półtrwania. Badanie wykazało również pozytywne powiązanie poziomów PFDA w surowicy i PFDoA z wieloletnimi praktykami strażarskimi ([Graber i in., 2021](#)). Wyniki te były zgodne z badaniem biomonitoringu z 2015 roku przeprowadzonym przez strażaków z południowej Kalifornii ([Dobraca i in., 2015](#)). Oba badania wykazały, że średnie stężenia kwasu perfluorodekanoowego w surowicy (PFDA) były trzykrotnie wyższe niż u uczestników NHANES. Badanie kohortowe przeprowadzone wyłącznie z kobietami w San Francisco wykazało podobne wyniki, gdzie kobiety strażaczki miały wyższe geometryczne średnie stężenia PFNA, PFHxS i PFUnDA niż pracownice biurowe ([Trowbridge i in., 2020](#)). To badanie było wyjątkowe, ponieważ porównywało strażaków z innymi osobami niebędącymi strażakami w tym samym obszarze geograficznym. Warto zauważyć, że porównanie z próbkami NHANES niekoniecznie odzwierciedla ogólny scenariusz ekspozycji na PFAS w danym obszarze.

Chociaż wyniki tych badań były spójne w różnych regionach geograficznych USA, jeśli chodzi o wyższe poziomy surowicy we krwi strażaków, profil surowicy i poziomy PFAS różniły się w zależności od regionu. Jedno badanie w południowej Kalifornii nie wykazało wykrywalnych poziomów PFDoA w surowicy ([Dobraca i in., 2015](#)) podczas gdy inne badanie w New Jersey wykryło istotnie podwyższone poziomy PFDoA w surowicy ([Graber i in., 2021](#)). Poziom w surowicy PFDoA był dwukrotnie wyższy niż u uczestników NHANES ([Graber i in., 2021](#)). Podobnie, średnie poziomy PFHxS i PFOS w surowicy różniły się w zależności od lokalizacji. Ekspozycja na tło wynikająca z użytkowania produktów konsumenckich ([Lindstrom i in., 2011](#)), zanieczyszczenie żywności i wody pitnej ([Xu i in., 2021](#)), bliskość obiektów przemysłowych ([Steenland i in., 2009](#); [Schroeder i in., 2021](#)), oraz wojskowych baz lotniczych ([Xu i in., 2021](#)) może również przyczyniać się do wysokich poziomów niektórych PFAS w różnych obszarach geograficznych. W badaniu kobiety strażaczki przydzielone do remizy na lotnisku zgłaszały dwukrotnie wyższy poziom PFNA niż strażacy przydzieleni do innych komisariatów w San Francisco ([Trowbridge i in., 2020](#)). Strażacy na lotniskach w regionie południowo-zachodniego Ohio mieli o 21%–62% wyższe stężenie surowicy PFAS niż strażacy z przedmieść ([Leary i in., 2020](#)). Podobnie badanie w Finlandii zaobserwowało, że ćwiczenia związane z AFFF w celu gaszenia pożarów paliwa lotniczego zwiększały stężenia PFNA w surowicy u strażaków ([Laitinen i in., 2014](#)). Chociaż PFNA nie jest uznawana za główny składnik AFFF, te obserwacje wskazują na inne możliwe źródła PFAS w miejscach pożarowych niż piana gaśnicza. Badania obserwacyjne wykazały, że kobiety strażaczki miały niższe poziomy większości PFAS w porównaniu do mężczyzn ([Wong i in., 2014](#); [Trowbridge i in., 2020](#)). Związki perfluorowane mają większe powinowactwo do białek wiążących kwasy tłuszczowe we krwi, dlatego część PFAS może być usuwana z organizmu podczas cykli dawców krwi lub menstruacji ([Jones i in., 2003](#); [Rickard i in., 2022](#)). Stwierdzono, że strażacy dawcy krwi mają niższe poziomy PFAS niż strażacy niebędący dawcami przy podobnym narażeniu ([Rotander i in., 2015](#)), co sugeruje, że dawstwo osocza może być możliwą ścieżką eliminacji ([Wong i in., 2014](#); [Silver i in., 2021](#)).

7 Narażenie na PFAS i rak

Przeprowadzono szeroko zakrojone badania analizujące możliwe związki między poziomem PFAS we krwi a szkodliwymi skutkami zdrowotnymi u ludzi (Fletcher i in., 2013; Wielsøe i in., 2015; Croce i in., 2019; Jain i Ducatman, 2019; Wang i in., 2019; Li i in., 2021). PFOA i PFOS to dwa najlepiej przebadane związki PFAS, a w dalszej kolejności PFHxS i PFNA (Kim i in., 2021).

Badania te sugerują, że wysoki poziom ekspozycji na niektóre PFAS może prowadzić do szeregu niekorzystnych następstw zdrowotnych. Skutki te obejmują rakotwórczość (Jalilian i in., 2019), zaburzenia hormonalne (Chain i in., 2018), immunotoksyczność (Chain i in., 2018), zmiany funkcji wątroby (Gleason i in., 2015), niską masę urodzeniową płodu (Wikström i in., 2020), podwyższony poziom lipidów (Steenland i in., 2009), indukcję nowotworów (Chain i in., 2018) oraz otyłość (Graber i in., 2021). Poziom narażenia na PFAS może różnić się w zależności od miejsca zamieszkania lub wykonywanego zawodu. Ponadto niski poziom ekspozycji przez długi czas może stwarzać inne rodzaje ryzyka zdrowotnego. Badania nad długoterminowymi skutkami narażenia na niskie poziomy określonych PFAS wciąż trwają.

Niekorzystne skutki zdrowotne zgłaszane u strażaków są podobne do tych występujących w innych grupach zawodowych i populacji ogólnej narażonej na PFAS, włączając w to ryzyko wystąpienia określonych nowotworów (Goodrich i in., 2021). Biorąc pod uwagę wyższe wskaźniki zachorowalności na niektóre typy nowotworów oraz zgonów z nimi związanych wśród strażaków, w kilku badaniach sprawdzono związki między narażeniem zawodowym strażaków a zapadalnością na raka (Jalilian i in., 2019; Soteriades i in., 2019). Wyniki były niespójne, ale ogólnie sugerują zwiększone ryzyko niektórych typów nowotworów, takich jak rak jelita grubego, prostaty i jąder (Soteriades i in., 2019). Oprócz PFAS strażacy są narażeni na szereg czynników chemicznych, z których niektóre są znanymi kancerogenami, jak benzen i benzo[a]piren (Guerreiro i in., 2016). Mało wiadomo na temat potencjalnych niekorzystnych skutków przewlekłego narażenia na tak złożone mieszaniny. Większość istniejących dotychczas badań koncentrowała się na skutkach zdrowotnych poszczególnych związków perfluorowanych, a tylko nieliczne analizowały ich efekty łączone (Ojo i in., 2020; Ojo i in., 2021). Aby odzwierciedlić rzeczywistą ekspozycję i dokonać dokładnej oceny ryzyka, przyszłe badania muszą przenieść punkt ciężkości na badanie tak złożonych mieszanin chemikaliów zamiast pojedynczych substancji. Jednak jednym z wyzwań w ocenie ryzyka mieszanin są możliwe interakcje między chemikaliami (tj. efekty synergistyczne lub antagonistyczne), które mogą wpływać na ich wspólne działanie.

Choć coraz większa liczba publikacji sugeruje związek między podwyższonym poziomem PFAS w surowicy a zapadalnością na nowotwory, mechanizmy rakotwórczego działania PFAS nie zostały jeszcze w pełni poznane. Możliwym mechanizmem epigenetycznym jest zmiana metylacji DNA pod wpływem narażenia zawodowego u strażaków – procesu, który odgrywa istotną rolę w prawidłowej regulacji ekspresji genów (Zhou i in., 2019; Goodrich i in., 2021). Zmiany w profilu metylacji DNA mogą powodować inaktywację niektórych genów supresorowych nowotworów, zwiększając tym samym ryzyko raka (Zhou i in., 2019). W ostatnich latach coraz więcej badań analizuje zmiany epigenetyczne związane z narażeniem na PFAS. Badania epigenetyczne koncentrują się na zmianach w ekspresji genów bez zmian w sekwencji DNA, wynikających z czynników środowiskowych, takich jak ekspozycja chemiczna (Kim i in., 2021). Metylacja DNA, modyfikacja histonów oraz ekspresja mikroRNA (miRNA) to trzy kategorie mechanizmów epigenetycznych (Kim i in., 2021). Zmiany metaboliczne wywołane przez PFAS to kolejny proponowany mechanizm ich działania prorakotwórczego. Przeprogramowanie metaboliczne jest istotną cechą charakterystyczną nowotworu (Phan i in., 2014). PFAS mogą zakłócać procesy metaboliczne organizmu i wywoływać zmiany biochemiczne oraz fizjologiczne (Jiang i in., 2015; Imir i in., 2021). Ze względu na podobieństwo strukturalne do kwasów tłuszczowych, PFAS mogą zmieniać metabolizm ogólnoustrojowy

poprzez wiązanie się z transporterami kwasów tłuszczowych i enzymami metabolicznymi (Jiang i in., 2015; Roth i in., 2020; Imir i in., 2021). Zarówno badania na zwierzętach, jak i na ludziach dostarczyły dowodów na niekorzystne skutki metaboliczne wywołane przez PFAS (Knox i in., 2011; Geiger i in., 2014; Yu i in., 2016; Alderete i in., 2019).

Biorąc pod uwagę, że wątroba jest głównym organem docelowym przechowywania długotańcuchowych PFAS, niektórzy badacze analizowali wpływ PFAS na ludzkie komórki wątroby (Ojo i in., 2020; Ojo i in., 2021). Wyniki badań *in vitro* wykazały zależność między ekspozycją na PFOA a zmienioną metylacją DNA w zależności od dawki (Tian et al., 2012). Inne badania wskazały stres oksydacyjny jako możliwą przyczynę modyfikacji epigenetycznych. Narażenie komórek wątroby na PFOS obniżyło aktywność komórkową i zwiększyło poziom reaktywnych form tlenu (ROS) w sposób zależny od stężenia (Ojo i in., 2020). Jednak testowane dawki PFAS były wyższe niż poziomy spotykane w środowisku, co wskazuje, że badania te mogą słabo przewidywać reakcje ludzi na rzeczywistą ekspozycję. Działanie rakotwórcze niektórych PFAS badano również na różnych modelach zwierzęcych. Narażenie na PFOA w modelach gryzoni powiązano z rozwojem komórek nowotworowych w wątrobie, trzustce i jądrach (Steenland i Winqvist, 2021). Podobnie badania na pstrągu tęczowym wykazały, że ekspozycja na PFOA sprzyjała rozwojowi guzów wątroby (Steenland i Winqvist, 2021). Niedawne badanie przeprowadzone przez National Toxicology Program (NTP) dostarczyło dowodów na powstawanie złośliwych nowotworów wątroby u samców szczurów (Sprague-Dawley) wywołane ekspozycją na PFOA (Program, 2020). Zaobserwowany związek między stężeniem PFOA w osoczu a częstością występowania nowotworów sugeruje potencjalną zależność między wysokim poziomem PFAS w surowicy krwi a zwiększonym ryzykiem raka (Program, 2020). Analogicznie, narażenie wątroby szczurów rasy Albino Wistar na PFOS wykazało wywołane przez te związki zmiany w ekspresji miRNA i powiązanie z karcynogenezą wątroby (Wang i in., 2012). Chociaż badania te wspierają tezę o potencjalnym procesie rozwoju raka, mechanizmy te mogą nie być w pełni adekwatne dla ludzi.

Ponadto prace skoncentrowane wyłącznie na PFOA i PFOS mogą nie zapewniać pełnego zrozumienia relacji między narażeniem na PFAS a nowotworami u strażaków. W tym względzie ludzkie badania epidemiologiczne pozwalają uniknąć niepewności związanych z ekstrapolacją międzygatunkową. Kilka badań epidemiologicznych zasugerowało związek między wysokim poziomem PFAS w surowicy krwi a zwiększonym ryzykiem nowotworów (Steenland i in., 2020; Bartell i Vieira, 2021). Niedawna metaanaliza wykazała, że każdy wzrost stężenia PFOA w surowicy o 10 ng/mL zwiększa średnie ryzyko raka nerki i jądra odpowiednio o 16% i 3% (Bartell i Vieira, 2021). Inne badanie wykazało, że dowody epidemiologiczne pozostają wspierające, ale nie rozstrzygające w kwestii związku ekspozycji na PFOA z zachorowalnością na raka nerki i jądra (Steenland i in., 2020). Jeszcze inne prace epidemiologiczne dostarczyły dowodów na zmiany epigenetyczne wywołane przez PFAS zarówno w populacjach dorosłych, jak i w kohortach urodzeniowych (Kim i in., 2021). Jednak liczba badań w kontekście ekspozycji strażaków jest ograniczona. Jedno z badań epigenetycznych wykazało związek między latami pracy w straży pożarnej a zmienioną metylacją DNA (Zhou i in., 2019). Zaobserwowano w nim również, że wzorce metylacji DNA różniły się między niepalącymi mężczyznami pracującymi jako strażacy a nowymi rekrutami (Zhou i in., 2019). Zmienioną ekspresję miRNA powiązano również z narażeniem na PFAS wynikającym z lat służby (Jeong i in., 2018). Zmiany epigenetyczne są częścią procesu prowadzącego do powstawania nowotworów. ([Lu et al., 2020](#)). Zmiany

epigenetyczne wywołane przez PFAS mogą więc służyć jako biomarker do przewidywania potencjalnych skutków zdrowotnych w społeczności strażaków narażonych na kontakt z doświadczeniem. Ze względu na nieprzewidywalność i wyzwania związane z miejscami pożaru, monitorowanie narażenia strażaków jest bardzo skomplikowane. Ostatnio uwaga przesunęła się na biomonitoring, który może przewyższyć niektóre wyzwania i stać się cennym narzędziem do oceny skutków zdrowotnych. W takim przypadku poziom biomarkerów może się różnić w zależności od czynników, takich jak istniejące wcześniej schorzenia ([Jabeen i in., 2020](#)), nawyki palenia ([Soteriades i in., 2019](#)), oraz drugie doświadczenie zawodowe ([Soteriades i in., 2019](#)). Przyszłe badania powinny uwzględniać te czynniki przy jednoczesnym badaniu związku między narażeniem strażaków na PFAS a zachorowaniem na nowotwory.

8 Wyzwania związane z PFAS w ocenie zagrożeń

Określenie oceny ryzyka zdrowotnego PFAS i ich prekursorów jest trudne. Wynika to z faktu, że 1) PFAS to duża, zróżnicowana grupa substancji, co utrudnia łatwe rozróżnienie przy ocenie i leczeniu. To utrudnia zrozumienie, które PFAS mogą być istotne dla oceny potencjalnego ryzyka zdrowia ludzi. 2) Bardzo ograniczone informacje na temat toksyczności PFAS i jej wpływu na zdrowie publiczne są dostępne, co sprawia, że ocena specyficzna dla chemikaliów różnych PFAS jest niemal niemożliwa. 3) Ludzie często są narażeni na nieznane mieszanki PFAS, które mogą powodować efekty synergiczne. 4) Badania toksyczności często nie mają podobieństw między testami u zwierząt a obserwacjami u ludzi, co sprawia, że istotność tych badań nad toksycznością jest niepewna ([Anderson i in., 2022](#)).

Grupowanie PFAS do oceny mieszaniny stanowi wyzwanie ze względu na złożoność bazy danych oraz różnice w wytycznych regulacyjnych między krajami. Oceny zagrożeń dla PFAS zazwyczaj opierają się na badaniach obejmujących reprezentatywne związki ołowiu, takie jak PFOA, PFOS, PFHxS, dla których dostępne są informacje chemiczne, toksyczne i występujące ([Colnot i Dekant, 2021](#)). Istnieją poważne luki w rozumieniu chemii i toksyczności PFAS, które utrudniają podejście do oceny ryzyka w standardowych mieszaninach. W klasie PFAS występują znaczne różnice w ich właściwościach fizykochemicznych. Różnorodność ich struktur chemicznych, zastosowań, a następnie uwalniania do środowiska i ekspozycji sprawia, że model oceny ryzyka narażenia jest bardzo złożony. [Kwiatkowski i in. \(2020\)](#) zasugerował, że PFAS należy traktować jako jedną klasę, a ocena ryzyka powinna być przeprowadzona odpowiednio ([Kwiatkowski i in., 2020](#)).

9 Zakończenie

PFAS są szeroko stosowane w wyposażeniu strażaków (AFFF), a także występują w powietrzu i kurzu na miejscu pożaru i w remizie straży. Dlatego ryzyko narażenia na PFAS jest wyższe dla strażaków niż u ogółu społeczeństwa ze względu na zajęcia zawodowe podczas gaszenia pożarów. Wzrost wskaźnika zachorowań na raka wśród strażaków w porównaniu z ogólną populacją oraz powiązania między PFAS a nowotworem wzbudziły obawy dotyczące narażenia na PFAS w straży pożarnej. Wyposażenie zwrotnicze może być potencjalnym źródłem ekspozycji na PFAS, ponieważ PFCA i FTOH mogą być uwalniane z urządzeń rozrzutniowych poprzez degradację wykończeń odbojnych na wodę i oleje lub przez uwolnienie zanieczyszczenia PFAS na miejscu pożaru. Te niepolimerowe PFAS mogą być następnie potencjalnie wchłaniane poprzez wdychanie, spożycie i dermalne wchłanianie do organizmu strażaka. ePTFE stosowany w barierze przeciwwilgociowej mechanizmu zwrotniczego jest

zazwyczaj uważany za polimer o niskim stopniu troski. Jednak proces produkcji ePTFE wykorzystuje PFAS o niskiej masie cząsteczkowej jako środki wspomagające przetwarzanie polimerów. W związku z tym, w zależności od rodzaju fałszowania, polimer PTFE nadal może powodować negatywne skutki zdrowotne poprzez uwalnianie niepolimerowych PFAS. Chociaż sprzęt zwrotnicowy został zidentyfikowany jako źródło PFAS, potrzebne są dalsze badania, aby ocenić poziom narażenia na PFAS od sprzętu do strażaków. Ponadto sprzęt zwrotny może zostać skażony PFAS z dymu podczas pożaru konstrukcyjnego lub AFFF zawierającym PFAS, które następnie stanowią źródło ekspozycji. Stosowanie AFFF podczas gaśnienia pożarów było głównym źródłem ekspozycji na PFAS dla strażaków i społeczeństwa ze względu na zanieczyszczenie wód gruntowych. Negatywne skutki stosowania PFOA i PFOS w AFFF już zmusiły producentów do przejścia na krótsze alternatywy PFAS, a ostatnio także na alternatywy bez fluoru. Jednak krótkołańcuchowe alternatywy mogą nadal powodować negatywne skutki zdrowotne i ekotoksyczność, których nie można pominąć. Nieznane fluorowane składniki AFFF oraz ich produkty degradacji wciąż wymagają identyfikacji. Pył wewnątrz remis strażackich może działać jako rezerwuuar chemiczny PFAS, gdy związki wypływają się z zanieczyszczonych produktów. Dlatego powietrze i pył wewnątrz remis strażackiej zawierają wysokie stężenia PFAS pochodzących z zanieczyszczonego sprzętu, używania AFFF lub innych produktów zawierających PFAS obecnych wewnątrz remizy. Inne źródła PFAS wewnątrz remis, które należy dalej zbadać, aby osiągnąć środowisko wolne od PFAS w remizach. Spożywanie i wdychanie pyłu i powietrza w pomieszczeniach to powszechne drogi narażenia na PFAS. Wchłanianie skóry może być również dominującym szlakiem ekspozycji strażaków, który następuje w wyniku narażenia skóry na źródła zanieczyszczone PFAS. Do tej pory przeanalizowano tylko kilka celowanych PFAS w celu określenia ryzyka wchłaniania przez skórę. Potrzebne są szeroko zakrojone badania, aby lepiej zrozumieć dermalne wchłanianie innych związków PFAS. Wysoki poziom ekspozycji na PFAS w miejscu pracy przez dłuższy czas może zwiększać ryzyko rozwoju problemów zdrowotnych, w tym raka. Jednak złożone wzorce narażenia na PFAS pochodzące z wielu źródeł utrudniają przewidywanie związanych z tym ryzyk. Przyszłe badania muszą uwzględnić interakcje mieszanek PFAS oraz ocenić ich potencjalną toksyczność i skutki zdrowotne. Ponadto naukowcy mogliby wykorzystać badania epigenetyczne do scharakteryzowania narażenia strażaków zawodowego oraz ich związku z rozwojem DI związanych z pracą na morzu. Strażakom zaleca się ograniczenie narażenia na PFAS tak bardzo, jak to możliwe. Społeczność strażaków już zaczęła stosować zewnętrzne powłoki wolne od PFAS do swojego sprzętu zwrotniczego i zaczęła przechodzić na pianki bez fluoru. Jednak celowo dodawane PFAS do sprzętu zwrotniczego i pianki mogą nie być jedynymi źródłami narażenia na PFAS zawodowe, z jakimi strażacy się spotykają. Biorąc pod uwagę ilość PFAS używanej w produktach konsumenckich, elektronice, materiałach budowlanych, konstrukcjach i pojazdach, możliwe jest, że te chemikalia mogą zostać uwolnione podczas spalania i prowadzić do dodatkowych narażeń strażaków reagujących na miejsce. Te narażenia mogą obejmować zagrożenia oddechowe, bezpośredni kontakt ze skórą lub osiadanie i zanieczyszczenie sprzętu zwrotnego, co wykazano w przypadku wielu innych zanieczyszczeń z terenów pożarowych oraz rakotwórczych substancji, takich jak policykliczne węglowodory aromatyczne. Dlatego ogólna rekomendacja to nie nosić sprzętu zwrotnego tam, gdzie nie jest on potrzebny (np. podczas wizyty medycznej, użytku osobistego, określonych rodzajów szkoleń itp.). Dekontaminacja powinna być również przeprowadzana ostrożnie po każdym zgłoszeniu pożaru, aby mieć

pewność, że reziduary nie zostaną zanieczyszczenia rakotwórczymi substancjami z miejsca pożaru.

Wkład autorów

N-U-SM, AH i RO wnieśli wkład w koncepcję i projekt manuskryptu. N-U-SM, MH i FJ napisali pierwszą wersję roboczą manuskryptu. AG, AH i JL napisali poszczególne sekcje manuskryptu. AH i RO dokonali krytycznego przeglądu manuskryptu pod kątem istotnej treści intelektualnej. RO nadzorował pisanie manuskryptu. Wszyscy autorzy wnieśli wkład w rewizję manuskryptu, przeczytali i zatwierdzili przesłaną wersję.

Finansowanie

Projekt został sfinansowany ze środków Fire Prevention and Safety Grants (EMW-2020-FP-01120), będących częścią programu Assistance to Firefighters Grant Program Federalnej Agencji Zarządzania Kryzysowego (FEMA).

Konflikt interesów

Autorzy oświadczają, że badania zostały przeprowadzone przy braku jakichkolwiek powiązań handlowych lub finansowych, które mogłyby zostać zinterpretowane jako potencjalny konflikt interesów. Wszystkie twierdzenia wyrażone w tym artykule są wyłącznie zastrzeżeniami autorów i niekoniecznie odzwierciedlają twierdzenia ich organizacji powiązanych ani wydawcy, redaktorów i recenzentów. Każdy produkt, który może być oceniany w tym artykule lub twierdzenie przedstawione przez producenta, nie jest gwarantowany ani poparty przez wydawcę.

Bibliografia

1. Abraham, K., i Monien, B. H. (2022). Transdermalne wchłanianie ^{13}C 4-perfluorooktanowego ($^{13}\text{C}_4\text{-PFOA}$) z kremu z filtrem u męskiego ochotnika – Jaki może być wkład kosmetyków w wewnętrzną ekspozycję na substancje perfluoroalkilowe (PFAS)? *Otoczenie. Int.* 169, 107549. doi:10.1016/j.envint.2022.107549
2. Ahn, Y. S., Jeong, K. S. i Kim, K. S. (2012). Zachorowalność na raka wśród profesjonalnych ratowników ratunkowych w Korei. *Am. J. Industrial Med.* 55 (9), 768–778. doi:10.1002/ajim.22068
3. Alderete, T. L., Jin, R., Walker, D. I., Valvi, D., Chen, Z., Jones, D. P. i in. (2019). Substancje perfluoroalkilowe, profilowanie metabolomiczne i zmiany w homeostazie glukozy u dzieci latynoskiego z nadwagą i otyłością: analiza dowodu koncepcji. *Otoczenie. Int.* 126, 445–453. doi:10.1016/j.envint.2019.02.047
4. Alexander, B. M. i Baxter, C. S. (2016). Ognioodporne zanieczyszczenie odzieży ochronnej strażaków – potencjalne zagrożenie dla zdrowia strażaków. *J. Occup. Okolica. Hyg.* 13 (9), D148–D155. doi:10.1080/15459624.2016.1183016
5. Anderson, J., Brecher, R., Cousins, I. T., DeWitt, J., Fiedler, H., Kannan, K. i in. (2022). Grupowanie PFAS do oceny ryzyka zdrowia ludzi: ustalenia niezależnego panelu ekspertów. *Regul. Toksykol. Farmakol.* 134, 105226. doi:10.1016/j.yrtph.2022.105226
6. Appel, K. E., Gundert-Remy, U., Fischer, H., Faulde, M., Mross, K. G., Letzel, S. i in. (2008). Ocena ryzyka mundurów bojowych Bundeswehry (Bundeswehra (Federalne Siły

- Zbrojne Niemiec) nasyconych permetryną (BDU). *Int. J. Hyg. Okolica. Health* 211 (1-2), 88–104. doi:10.1016/j.ijheh.2007.10.005
7. Audenaert, F., Lens, H., Rolly, D. i Vander Elst, P. (1999). Fluorochemiczne środki odstraszające tekstylia – synteza i zastosowania: perspektywa 3M. *J. Text. Inst.* 90 (3), 76–94. doi:10.1080/00405009908659480
 8. Backe, W. J., Day, T. C., oraz Field, J. A. (2013). Chemikalia zwitterionowe, kationowe i anionowe fluorowane w formacjach piany formującej warstwę wodną oraz wodach gruntowych z baz wojskowych USA poprzez bezwodny wstrzyk dużej objętości HPLC-MS/MS. *Environ. Sci. Technol.* 47 (10), 5226–5234. doi:10.1021/es3034999
 9. Baduel, C., Mueller, J. F., Rotander, A., Corfield, J., oraz Gomez-Ramos, M.-J. (2017). Odkrycie nowych substancji per- i polifluoroalkilowych (PFAS) na poligonie szkoleniowym straży pożarnej oraz wstępne badania ich losu i mobilności. *Chemosphere* 185, 1030–1038. doi:10.1016/j.chemosphere.2017.06.096
 10. Bank, R., Smart, B., i Tatlow, J. (1994). *Chemia organofluoru: zasady i zastosowanie komercyjne*. Nowy Jork: Plenum i Elsevier.
 11. Banks, A. P. W., Engelsman, M., He, C., Wang, X. i Mueller, J. F. (2020). Występowanie PAH i środków opóźniających palność w powietrzu oraz kurzu z australijskich stacji strażackich. *J. Occup. Okolica. Hyg.* 17 (2-3), 73–84. doi:10.1080/15459624.2019.1699246
 12. Bartell, S. M. oraz Vieira, V. M. (2021). Krytyczna recenzja na temat PFOA, raka nerki i raka jąder. *J. Zarządzanie Lotnictwem i Odpadami. Stowarzyszenie.* 71 (6), 663–679. doi:10.1080/10962247.2021.1909668
 13. Barzen-Hanson, K. A., Roberts, S. C., Choyke, S., Oetjen, K., McAlees, A., Riddell, N., i in. (2017). Odkrycie 40 klas substancji per- i polifluoroalkilowych w historycznych wodnych pianach tworzących film (AFFF) oraz w wodach podziemnych dotkniętych działaniem AFFF. *Environ. Sci. Technol.* 51 (4), 2047–2057. doi:10.1021/acs.est.6b05843
 14. Bates, M. N. (2007). Oparte na rejestrach badanie kliniczno-kontrolne nowotworów u strażaków w Kalifornii. *Am. J. Industrial Med.* 50 (5), 339–344. doi:10.1002/ajim.20446
 15. Beecher, N. i Brown, S. (2018). PFAS a zarządzanie pozostałościami organicznymi. *BioCycle* 59, 20.
 16. Benskin, J. P., Ikononou, M. G., Gobas, F. A., Begley, T. H., Woudneh, M. B. i Cosgrove, J. R. (2013). Biodegradacja N-etyloperfluorooktanosulfonamidoetanolu (EtFOSE) oraz diestru fosforanowego na bazie EtFOSE (diester SAmPAP) w osadach morskich. *Environ. Sci. Technol.* 47 (3), 1381–1389. doi:10.1021/es304336r
 17. Blum, A., Balan, S. A., Scheringer, M., Trier, X., Goldenman, G., Cousins, I. T., i in. (2015). Oświadczenie z Madrytu w sprawie substancji poli- i perfluoroalkilowych (PFAS). *Environ. Health Perspect.* 123 (5), A107–A111. doi:10.1289/ehp.1509934
 18. Blum, A., Gold, M. D., Ames, B. N., Kenyon, C., Jones, F. R., Hett, E. A., i in. (1978). Dzieci wchłaniają środek ognioochronny tris-BP z odzieży do spania: mocz zawiera mutageny metabolit, 2,3-dibromopropanol. *Science* 201 (4360), 1020–1023. doi:10.1126/science.684422
 19. Bonefeld-Jorgensen, E. C., Long, M., Bossi, R., Ayotte, P., Asmund, G., Krüger, T., i in. (2011). Związki perfluorowane są powiązane z ryzykiem raka piersi u grenlandzkich

Inuitów: badanie kliniczno-kontrolne. *Environ. Health* 10 (1), 88–16. doi:10.1186/1476-069x-10-88

20. Boyd, R. I., Ahmad, S., Singh, R., Fazal, Z., Prins, G. S., Madak Erdogan, Z., i in. (2022). W stronę mechanistycznego zrozumienia substancji poli- i perfluoroalkilowych oraz nowotworów. *Cancers* 14 (12), 2919. doi:10.3390/cancers14122919
21. Brandsma, S., Koekkoek, J., Van Velzen, M. i de Boer, J. (2019). Zamiennik PFOA – GenX wykryty w środowisku w pobliżu zakładu produkującego fluoropolimery w Holandii. *Chemosphere* 220, 493–500. doi:10.1016/j.chemosphere.2018.12.135
22. Brown, F. R., Whitehead, T. P., Park, J.-S., Metayer, C. i Petreas, M. X. (2014). Poziomy bromowanych środków ognioochronnych niebędących polibromowanymi eterami difenylowymi w próbkach pyłu domowego i pyłu z remiz strażackich w Kalifornii. *Environ. Res.* 135, 9–14. doi:10.1016/j.envres.2014.08.022
23. Buck, R. C., Franklin, J., Berger, U., Conder, J. M., Cousins, I. T., De Voogt, P., i in. (2011). Substancje perfluoroalkilowe i polifluoroalkilowe w środowisku: terminologia, klasyfikacja i pochodzenie. *Integr. Environ. Assess. Manag.* 7 (4), 513–541. doi:10.1002/ieam.258
24. Buck, R. C., Murphy, P. M. i Pabon, M. (2012). „Chemia, właściwości i zastosowania komercyjnych fluorowanych środków powierzchniowo czynnych”, w: *Polyfluorinated chemicals and transformation products* (Berlin, Niemcy: Springer), 1–24.
25. Buck, R. C. (2015). „Dane toksykologiczne dla alternatywnych substancji fluorowanych „krótkołańcuchowych””, w: *Toxicological effects of perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances* (Berlin, Niemcy: Springer), 451–477.
26. Bursian, S., Link, J., McCarty, M. i Simcik, M. (2020). Podostra toksyczność PFOS i/lub PFOA oraz historycznych wodnych pian tworzących film dla piskląt przepiórki japońskiej (*Coturnix japonica*). *Environ. Toxicol. Chem.* 40 (3), 695–710. doi:10.1002/etc.4684
27. Calafat Antonia, M., Wong, L.-Y., Zsuzsanna, K., Reidy John, A. i Needham Larry, L. (2007). Substancje polifluoroalkilowe w populacji USA: dane z ogólnokrajowego badania zdrowia i żywienia (NHANES) 2003–2004 oraz porównania z NHANES 1999–2000. *Environ. Health Perspect.* 115 (11), 1596–1602. doi:10.1289/ehp.10598
28. Cariou, R., Veyrand, B., Yamada, A., Berrebi, A., Zalko, D., Durand, S., i in. (2015). Poziomy i profile kwasów perfluoroalkilowych (PFAA) w mleku kobiecym, surowicy matek i krwi pępowinowej kobiet francuskich oraz ich noworodków. *Environ. Int.* 84, 71–81. doi:10.1016/j.envint.2015.07.014
29. Casjens, S., Brüning, T. i Taeger, D. (2020). Ryzyko nowotworowe u strażaków: przegląd systematyczny i metaanaliza trendów świeckich oraz różnic regionalnych. *Int. Archives Occup. Environ. Health* 93 (7), 839–852. doi:10.1007/s00420-020-01539-0
30. Panel EFSA ds. Środków do Kontaktu z Żywnością, Enzymów i Substancji Pomocniczych (CEP), Knutsen, H. K., Alexander, J., Barregård, L., Bignami, M., Brüschweiler, B., i in. (2018). Ryzyko dla zdrowia ludzkiego związane z obecnością kwasu perfluorooktanosulfonowego i kwasu perfluorooktanowego w żywności. *EFSA J.* 16 (12), e05194. Chain, E. P. O. C. I. T. F., Schrenk, D., Bignami, M., Bodin, L., Chipman, J. K., del Mazo, J. i in. (2020). Ryzyko dla zdrowia ludzi związane z obecnością substancji perfluoroalkilowych w żywności. *Sędzia EFSA.* 18 (9), e06223.

31. Chang, E. T., Adami, H.-O., Boffetta, P., Cole, P., Starr, T. B. oraz Mandel, J. S. (2014). Krytyczny przegląd narażenia na perfluoroktanosulfonian i perfluorooktanosulfonian oraz ryzyka nowotworów u ludzi. *null* 44, 1–81. doi:10.3109/10408444.2014.905767
32. Chen, F., Yin, S., Kelly, B. C. i Liu, W. (2017). Izomerowo-specyficzny transplacentalny transfer kwasów perfluoroalkilowych: Wyniki badania sparowanych surowców matczyńskich, pępowinowych i łożyskowych. *Środowisko. Sci. Technol.* 51 (10), 5756–5763. doi:10.1021/acs.est.7b00268
33. Colnot, T., i Dekant, W. (2021). Problemy związane z oceną zagrożeń i ryzyka mieszanin substancji perfluoroalkilowych. *Toxicol. Lett.* 353, 79–82. doi:10.1016/j.toxlet.2021.10.005
34. Cousins, I. T., Vestergren, R., Wang, Z., Scheringer, M. oraz McLachlan, M. S. (2016). Zasada ostrożności i zarządzanie chemikaliami: Przykład kwasów perfluoroalkilowych w wodach gruntowych. *Otoczenie. Int.* 94, 331–340. doi:10.1016/j.envint.2016.04.044
35. Croce, L., Coperchini, F., Tonacchera, M., Imbriani, M., Rotondi, M. i Chiovato, L. (2019). Wpływ długołańcuchowych i krótkołańcuchowych związków perfluorowanych na żywotność i odpowiedź na TSH hodowanych komórek tarczycy. *J. Endokrynol. Investigation* 42 (11), 1329–1335. doi:10.1007/s40618-019-01062-1
36. Dai, Z., Xia, X., Guo, J. i Jiang, X. (2013). Bioakumulacja i drogi pobierania kwasów perfluoroalkilowych w *Daphnia magna*. *Chemosphere* 90 (5), 1589–1596. doi:10.1016/j.chemosphere.2012.08.026
37. Daniels, R. D., Bertke, S., Dahm, M. M., Yiin, J. H., Kubale, T. L., Hales, T. R. i in. (2015). Relacje ekspozycji i odpowiedzi dla wybranych wyników zdrowotnych nowotworów i nienowotworowych w kohorcie amerykańskich strażaków z San Francisco, Chicago i Filadelfii (1950–2009). *Zajmij. Okolica. Med.* 72 (10), 699–706. DOI:10.1136/OEMED-2014-102671
38. Daniels, R. D., Kubale, T. L., Yiin, J. H., Dahm, M. M., Hales, T. R., Baris, D. i in. (2014). Śmiertelność i zachorowanie na raka w grupie amerykańskich strażaków z San Francisco, Chicago i Filadelfii (1950–2009). *Zajmij. Okolica. Med.* 71 (6), 388–397. DOI:10.1136/OEMED-2013-101662
39. Darwin, R. L., Ottman, R. E., Norman, E. L., Gott, J. E. i Hanauska, C. P. (1995). Piana i otoczenie: delikatna równowaga. *NFPA J.* 89 (3), 67–73.
40. Dauchy, X., Boiteux, V., Bach, C., Rosin, C., oraz Munoz, J.-F. (2017). Substancje per- i polifluoroalkilowe w koncentraty pian gaśniczych oraz próbkach wody pobranych w pobliżu miejsc dotkniętych użyciem tych pian. *Chemosphere* 183, 53–61. doi:10.1016/j.chemosphere.2017.05.056
41. Dauchy, X., Boiteux, V., Colin, A., Hémar, J., Bach, C., Rosin, C. i in. (2019). Głębokie przesiąkanie substancji per- i polifluoroalkilowych przez glebę na terenie placu szkolenia strażaków oraz późniejsze zanieczyszczenie wód gruntowych. *Chemosphere* 214, 729–737. doi:10.1016/j.chemosphere.2018.10.003
42. De Silva, A. O., Allard, C. N., Spencer, C., Webster, G. M. i Shoeib, M. (2012). Fluorowane związki organiczne zawierające fosfor: diestry kwasu polifluoroalkilofosforowego (diPAPs), perfluorofosfoniany (PFPA)s i perfluorofosfiniany (PFPIAs) w osiadłym kurzu domowym. *Environ. Sci. Technol.* 46 (22), 12575–12582. doi:10.1021/es303172p

43. Dechant, J. (1985). „Podręcznik nauki i technologii włókien”, w: Tom II. Chemiczna obróbka włókien i tkanin. Wykończenia funkcjonalne: Część B. Red. Menachem Lewin i Stephen B. Sello (Nowy Jork/Bazylea: Marcel Dekker).
44. Delahunt, B., Bethwaite, P. B. i Nacey, J. N. (1995). Ryzyko zawodowe raka nerkokomórkowego. Badanie kliniczno-kontrolne oparte na Rejestrze Nowotworów Nowej Zelandii. Br. J. Urology 75 (5), 578–582. doi:10.1111/j.1464-410x.1995.tb07410.x
45. Demers, P. A., DeMarini, D. M., Fent, K. W., Glass, D. C., Hansen, J., Adetona, O., i in. (2022). Rakotwórczość zawodowego narażenia strażaków. Lancet Oncol. 23 (8), 985–986. doi:10.1016/s1470-2045(22)00390-4
46. D'Hollander, W., Roosens, L., Covaci, A., Cornelis, C., Reynders, H., Van Campenhout, K., i in. (2010). Bromowane środki ognioochronne i związki perfluorowane w kurzu domowym z domów i biur we Flandrii, Belgia. Chemosphere 81 (4), 478–487. doi:10.1016/j.chemosphere.2010.07.043
47. Dobraca, D., Israel, L., McNeel, S., Voss, R., Wang, M., Gajek, R., i in. (2015). Biomonitoring u kalifornijskich strażaków: metale i związki perfluorowane. J. Occup. Environ. Med. 57 (1), 88–97. doi:10.1097/jom.0000000000000307
48. Domingo, J. L. i Nadal, M. (2019). Narażenie ludzi na substancje per- i polifluoroalkilowe (PFAS) poprzez wodę pitną: przegląd najnowszej literatury naukowej. Environ. Res. 177, 108648. doi:10.1016/j.envres.2019.108648
49. Driscoll, T. R., Carey, R. N., Peters, S., Glass, D. C., Benke, G., Reid, A., i in. (2016). Australijskie badanie narażenia w pracy: powszechność zawodowej ekspozycji na formaldehyd. Ann. Occup. Hyg. 60 (1), 132–138. doi:10.1093/annhyg/mev058
50. Eggeghy, P. P. i Lorber, M. (2011). Ocena narażenia Amerykanów na perfluorooktanosulfonian: porównanie szacowanego spożycia z wartościami wynioskowanymi z danych NHANES. J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol. 21 (2), 150–168. doi:10.1038/jes.2009.73
51. El Corporation (2014). Ocena kryteriów TZO (trwałych zanieczyszczeń organicznych) dla określonych krótkołańcuchowych perfluorowanych substancji alkilowych (przygotowana dla FluoroCouncil). Waszyngton, DC: ENVIRON International Corporation Arlington, VA.
52. EPA (2010). Zwolnienie z powiadomienia przedprodukcją dla polimerów; Nowelizacja zasady zwolnienia polimerów w celu wykluczenia niektórych polimerów perfluorowanych [Online]. Agencja Ochrony Środowiska (EPA). Dostępne: <https://www.federalregister.gov/documents/2010/01/27/2010-1477/premanufacture-notification-exemption-for-polymers-amendment-of-polymer-exemption-rule-to-exclude> [Dostęp: 25.05.2022].
53. Fasano, W., Kennedy, G., Szostek, B., Farrar, D., Ward, R., Haroun, L., i in. (2005). Przenikanie perfluorooktanianu amonu przez skórę szczura i człowieka in vitro. Drug Chem. Toxicol. 28 (1), 79–90. doi:10.1081/dct-39707
54. Fent, K. W., Alexander, B., Roberts, J., Robertson, S., Toennis, C., Sammons, D., i in. (2017). Zanieczyszczenie środków ochrony indywidualnej i skóry strażaków oraz skuteczność procedur dekontaminacji. J. Occup. Environ. Hyg. 14 (10), 801–814. doi:10.1080/15459624.2017.1334904

55. Fent, K. W., Eisenberg, J., Snawder, J., Sammons, D., Pleil, J. D., Stiegel, M. A., i in. (2014). Systemowe narażenie na WWA i benzen u strażaków gaszących kontrolowane pożary struktur. *Ann. Occup. Hyg.* 58 (7), 830–845. doi:10.1093/annhyg/meu036
56. Fent, K. W. i Evans, D. E. (2011). Ocena ryzyka dla strażaków ze strony oparów i gazów chemicznych podczas gaszenia pożarów pojazdów. *J. Environ. Monit.* 13 (3), 536–543. doi:10.1039/c0em00591f
57. Fent, K. W., Evans, D. E., Booher, D., Pleil, J. D., Stiegel, M. A., Horn, G. P., i in. (2015). Odgazowywanie lotnych związków organicznych ze środków ochrony indywidualnej strażaków po użyciu. *J. Occup. Environ. Hyg.* 12 (6), 404–414. doi:10.1080/15459624.2015.1025135
- Fenton, S. E., Ducatman, A., Boobis, A., DeWitt, J. C., Lau, C., Ng, C. i in. (2021). Przegląd toksyczności substancji per-i polifluoroalkilowych oraz zdrowia ludzi: Obecny stan wiedzy i strategie wspierające przyszłe badania. *Okolica. Toksykol. Chemia.* 40 (3), 606–630. doi:10.1002/etc.4890
58. Fletcher, T., Galloway, T. S., Melzer, D., Holcroft, P., Cipelli, R., Pilling, L. C. i in. (2013). Powiązania między PFOA, PFOS oraz zmianami w ekspresji genów zaangażowanych w metabolizm cholesterolu u ludzi. *Otoczenie. Int.* 57, 2–10. doi:10.1016/j.envint.2013.03.008
59. Fox, H., i Zisman, W. (1950). Rozprzestrzenianie się cieczy na powierzchniach o niskiej energii. I. politetrafluoroetylen. *J. Colloid Sci.* 5 (6), 514–531. doi:10.1016/0095-8522(50)90044-4
60. Franko, J., Meade, B., Frasc, H. F., Barbero, A. M. oraz Anderson, S. E. (2012). Potencjał penetracji perfluorooktanowej (PFOA) w skórę człowieka i myszy. *J. Toxicol. Okolica. Zdrowie, część A* 75 (1), 50–62. doi:10.1080/15287394.2011.615108
61. Fraser, A. J., Webster, T. F., Watkins, D. J., Nelson, J. W., Stapleton, H. M., Calafat, A. M. i in. (2012). Związki polifluorowane w surowicy związane z powietrzem w pomieszczeniach biurowych. *Środowisko. Sci. Technol.* 46 (2), 1209–1215. doi:10.1021/es2038257
62. Fromme, H., Tittlemier, S. A., Völkel, W., Wilhelm, M. i Twardella, D. (2009). Perfluorowane związki – ocena narażenia dla ogółu społeczeństwa w krajach zachodnich. *Int. J. Hyg. Okolica. Health* 212 (3), 239–270. doi:10.1016/j.ijheh.2008.04.007
63. Gannon, S. A., Johnson, T., Nabb, D. L., Serex, T. L., Buck, R. C. oraz Loveless, S. E. (2011). Wchłanianie, dystrybucja, metabolizm i wydalanie [1-14C]-perfluoroheksanoanu ([14C]-PFHx) u szczurów i myszy. *Toksykologia* 283 (1), 55–62. doi:10.1016/j.tox.2011.02.004
64. Gao, Y., Fu, J., Cao, H., Wang, Y., Zhang, A., Liang, Y. i in. (2015). Różnicowanie się w akumulacji i zachowaniu eliminacyjnym izomerów kwasu perfluoroalkilowego u pracowników zawodowych w fabryce w Chinach. *Środowisko. Sci. Technol.* 49 (11), 6953–6962. doi:10.1021/acs.est.5b00778
65. Gargoubi, S., Baffoun, A., Harzallah, O. A., Hamdi, M. oraz Boudokhane, C. (2020). Impregnacja wodoodporna dla tkanin bawełnianych za pomocą fluoropolimeru długołańcuchowego oraz jego ekologicznej alternatywy krótkołańcuchowej. *J. Text. Inst.* 111 (6), 835–845. doi:10.1080/00405000.2019.1664796
66. Gasiowski, R., Forbes, M. K., Silver, G., Krastev, Y., Hamdorf, B., Lewis, B. i in. (2022). Wpływ osocza i dawstwa krwi na poziomy substancji perfluoroalkilowych i

polifluoroalkilowych

u strażaków w Australii: randomizowane badanie kliniczne. *JAMA Netw Open* 5 (4), e226257. doi:10.1001/jamanetworkopen.2022.6257

67. Geiger, S. D., Xiao, J., Ducatman, A., Frisbee, S., Innes, K. i Shankar, A. (2014). Związek między PFOA, PFOS a poziomami lipidów w surowicy u nastolatków. *Chemosphere* 98, 78–83. doi:10.1016/j.chemosphere.2013.10.005
68. Gipe, R., i Peterson, H. (1972). "Tł: Pierwsza wodna piana formująca film (AFFF), wprowadzona do ognia morskiego," w *raporcie postępów NRL*.
69. Gleason, J. A., Post, G. B., oraz Fagliano, J. A. (2015). Powiązania stężeń perfluorowanych surowic chemicznych i biomarkerów funkcji wątroby i kwasu moczowego w populacji USA (NHANES), 2007–2010. *Okolica. Res.* 136, 8–14. doi:10.1016/j.envres.2014.10.004
70. Glüge, J., Scheringer, M., Cousins, I. T., DeWitt, J. C., Goldenman, G., Herzke, D. i in. (2020). Przegląd zastosowań substancji per-i polifluoroalkilowych (PFAS). *Środowisko. Proces naukowy. Uderzenia* 22 (12), 2345–2373. DOI:10.1039/d0em00291g
71. Goldenman, G., Fernandes, M., Holland, M., Tugran, T., Nordin, A., Schoumacher, C. i in. (2019). *Koszt bezczynności: Analiza społeczno-ekonomiczna wpływu na środowisko i zdrowie powiązanego z narażeniem na PFAS*. Kopenhaga, Dania: Nordycka Rada Ministrów.
72. Golka, K. i Weistenhöfer, W. (2008). Strażacy, produkty spalania i rak urothelium. *J. Toxicol. Okolica. Zdrowie, część B* 11 (1), 32–44. doi:10.1080/10937400701600396
73. Gonzalez, D., Thompson, K., Quinones, O., Dickenson, E. i Bott, C. (2021). Ocena losu, transportu i hamowania oczyszczania PFAS związanych z symulowanym uwolnieniem AFFF w oczyszczalni ścieków. *Chemosphere* 262, 127900. doi:10.1016/j.chemosphere.2020.127900
74. Goodrich, J. M., Calkins, M. M., Caban-Martinez, A. J., Stueckle, T., Grant, C., Calafat, A. M. i in. (2021). Substancje per-i polifluoroalkilowe, wiek epigenetyczny i metylacja DNA: Badanie przekrojowe strażaków. *Epigenomics* 13 (20), 1619–1636. doi:10.2217/epi-2021-0225
75. Graber, J. M., Alexander, C., Laumbach, R. J., Black, K., Strickland, P. O., Georgopoulos, P. G. i in. (2019). Poziomy krwi w podłożu i polifluoroalkilowych substancji (PFAS) po skażeniu lokalnego zaopatrzenia w wodę oraz porównanie z NHANES w latach 2013–2014. *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.* 29 (2), 172–182. doi:10.1038/s41370-018-0096-z
76. Graber, J. M., Black, T. M., Shah, N. N., Caban-Martinez, A. J., Lu, S.-e., Brancard, T. i in. (2021). Częstość występowania i predyktory poziomów w surowicy per-i polifluoroalkilowych substancji (PFAS) wśród członków ochotniczej straży pożarnej na przedmieściach USA. *Int. J. Environ. Res. public health* 18 (7), 3730. doi:10.3390/ijerph18073730
77. Grajeck, E. i Peterson, W. (1959). Fluorochemikalia: Nowy pomysł w tekstylach. *Am. Dyest. Rep.* 48 (13), 37–39.
78. Grandjean, P., i Clapp, R. (2015). Perfluorowane substancje alkilowe: Nowe informacje na temat ryzyka zdrowotnego. *Nowe rozwiązania w środowisku J. Environ. Health Policy* 25 (2), 147–163. doi:10.1177/1048291115590506

79. Gremmel, C., Frömel, T., i Knepper, T. P. (2016). Systematyczne wyznaczanie substancji perfluoroalkilowych i polifluoroalkilowych (PFAS) w kurtkach outdoorowych. *Chemosphere* 160, 173–180. doi:10.1016/j.chemosphere.2016.06.043
80. Gribble, M. O., Bartell, S. M., Kannan, K., Wu, Q., Fair, P. A. oraz Kamen, D. L. (2015). Podłużne pomiary substancji perfluoroalkilowych (PFAS) w surowicy Afroamerykanów gullah w Karolinie Południowej: 2003–2013. *Okolica. Res.* 143, 82–88. doi:10.1016/j.envres.2015.03.012
81. Guerreiro, C., Horálek, J., de Leeuw, F., i Couvidat, F. (2016). Benzo(a) pirenowy w Europie: stężenia w powietrzu, narażenie na populację oraz skutki zdrowotne. *Okolica. Zanieczyszczenia.* 214, 657–667. doi:10.1016/j.envpol.2016.04.081
82. Guo, J., Resnick, P., Efimenko, K., Genzer, J., oraz DeSimone, J. M. (2008). Alternatywne fluoropolimery, aby uniknąć problemów związanych z kwasem perfluorooktanowym. *Inżynieria przemysłowa, chemia res.* 47 (3), 502–508. doi:10.1021/ie0703179
83. Gützkow, K. B., Haug, L. S., Thomsen, C., Sabaredzovic, A., Becher, G., i Brunborg, G. (2012). Transfer łożyska perfluorowanych związków jest selektywny – to norweskie badanie podkohorty matki i dziecka. *Int. J. Hyg. Okolica. Health* 215 (2), 216–219. doi:10.1016
84. Hall, S. M., Patton, S., Petreas, M., Zhang, S., Phillips, A. L., Hoffman, K. i in. (2020). Substancje per- i polifluoroalkilowe w pyłu zbieranym z domów mieszkalnych i straży pożarnej w Ameryce Północnej. *Środowisko. Sci. Technol.* 54 (22), 14558–14567. doi:10.1021/acs.est.0c04869
85. Han, J.-S., Jang, S., Son, H.-Y., Kim, Y.-B., Kim, Y., Noh, J.-H. i in. (2020). Podostra toksyczność skórna kwasów karboksylowych perfluoroalkilowych: porównanie z różnymi długościami łańcuchów węgla u ludzkich odpowiedników skóry oraz ogólnoustrojowymi efektami kwasu perfluoroheptanonowego u szczurów Sprague Dawley. *Archiwa Toxicol.* 94 (2), 523–539. doi:10.1007/s00204-019-02634-z
86. Harrad, S., de Wit, C. A., Abdallah, M. A.-E., Bergh, C., Bjorklund, J. A., Covaci, A. i in. (2010). Zanieczyszczenie wewnątrz heksabromocyklododekanami, polibromowanymi eterami difenylowymi i związkami perfluoroalkilowymi: ważna droga ekspozycji dla ludzi? *Środowisko. Sci. Technol.* 44 (9), 3221–3231. Doi:10.1021/es903476t
87. Haug, L. S., Huber, S., Becher, G. i Thomsen, C. (2011a). Charakterystyka dróg narażenia ludzi na związki perfluorowane – Porównanie szacunków narażenia z biomarkerami narażenia. *Otoczenie. Int.* 37 (4), 687–693. doi:10.1016/j.envint.2011.01.011
88. Haug, L. S., Huber, S., Schlabach, M., Becher, G. i Thomsen, C. (2011b). Badanie związków per- i polifluorowanych w parowanych próbkach pyłu domowego i powietrza wewnętrznego z norweskich domów. *Środowisko. Sci. Technol.* 45 (19), 7991–7998. doi:10.1021/es103456h
89. Henry, B. J., Carlin, J. P., Hammerschmidt, J. A., Buck, R. C., Buxton, L. W., Fiedler, H. i in. (2018). Krytyczny przegląd stosowania polimerów o niskim stopniu troski i kryteria regulacyjne do fluoropolimerów. *Integr. Okolica. Oceniaj. Zarządzaj.* 14 (3), 316–334. DOI:10.1002/IEAM.4035

90. Hill, P. J., Taylor, M., Goswami, P. i Blackburn, R. S. (2017). Zastąpienie chemii PFAS w odzieży outdoorowej i wpływ na skuteczność odstraszania. *Chemosphere* 181, 500–507. doi:10.1016/j.chemosphere.2017.04.122
91. Høisæter, Å., Pfaff, A. i Breedveld, G. D. (2019). Łukowanie i transport PFAS z wodnej pianki formującej film (AFFF) w nienasyconej glebie w ośrodku szkoleniowym straży pożarnej w warunkach chłodnych klimatycznych. *J. Contam. hydrology* 222, 112–122. doi:10.1016/j.jconhyd.2019.02.010
92. Holmes, D. A. (2000). "Wodoodporne, oddychające tkaniny", w *Handbook of Technical Textiles*, 282315. Cambridge, Anglia: Woodhead Publishing Limited.
93. Holmquist, H., Schellenberger, S., van Der Veen, I., Peters, G., Leonards, P., oraz Cousins, I. T. (2016). Właściwości, wydajność i związane z nimi zagrożenia związane z nowoczesną, trwałą chemią wodoodporną (DWR) do wykończenia tekstyliów. *Otoczenie. Int.* 91, 251–264. doi:10.1016/j.envint.2016.02.035
94. Holzapfel, W. (1966). Zastosowania fluorowanych chemikaliów. *Fette, Seifen, Anstrichm.* 68 (10), 837–842.
95. Honda, K., Morita, M., Otsuka, H. i Takahara, A. (2005). Struktura agregacji molekularnej i właściwości powierzchniowe cienkich warstw poli (fluoroalkilowego akrylianu). *Makrocząsteczki* 38 (13), 5699–5705. doi:10.1021/ma050394k
96. Hopkins, Z. R., Sun, M., DeWitt, J. C. i Knappe, D. R. (2018). Niedawno wykryto zanieczyszczenia wody pitnej: GenX oraz inne kwasy eterowe per-i polifluoroalkilowe. *Journal-American Water Works Assoc.* 110 (7), 13–28. doi:10.1002/awwa.1073
97. Houtz, E. F., Higgins, C. P., Field, J. A. i Sedlak, D. L. (2013). Utrzymywanie się prekursorów kwasu perfluoroalkilowego w wodach gruntowych i glebie dotkniętych AFFF. *Środowisko. Sci. Technol.* 47 (15), 8187–8195. doi:10.1021/es4018877
98. Huang, H., Yu, K., Zeng, X., Chen, Q., Liu, Q., Zhao, Y. i in. (2020). Związek między prenatalną ekspozycją na substancje perfluoroalkilowe a infekcjami dróg oddechowych u dzieci przedszkolnych. *Okolica. Res.* 191, 110156. doi:10.1016/j.envres.2020.110156
99. Hulett, D. M., Bendick, M., Sheila, Y. i Thomas, F. (2007). *Wzmacnianie włączania kobiet do straży pożarnej*. Waszyngton, D.C: Bendick and Egan Economic Consultants, Inc.
100. Grupa robocza IARC ds. oceny ryzyka rakotwórczego dla ludzi (2010). Malowanie, gaszenie pożarów i praca na zmiany. *IARC Monogr. Ocena. Karcinog. Ryzyka Ludzie* 98, 9–764.
101. Imir, O. B., Kaminsky, A. Z., Zuo, Q.-Y., Liu, Y.-J., Singh, R., Spinella, M. J. i in. (2021). Ekspozycja na substancje per-i polifluoroalkilowe w połączeniu z dietą wysokotłuszczową wspiera postęp raka prostaty. *Składniki odżywcze* 13 (11), 3902. doi:10.3390/nu13113902
102. Inoue, K., Okada, F., Ito, R., Kato, S., Sasaki, S., Nakajima, S. i in. (2004). Perfluorooktanowy sulfonian (PFOS) i powiązane związki perfluorowane w próbkach krwi matki i pępowiny: Ocena narażenia na PFOS w populacji podatnej na pępowinę w czasie ciąży. *Środowisko. Perspektywa zdrowia.* 112 (11), 1204–1207. Doi:10.1289/ehp.6864
103. Islam, M. T., Rahman, M. M. i Mazumder, N. U. S. (2020). „Polimery do produkcji tekstylnej”, w: *Frontiers of textile materials: Polymers, nanomaterials, enzymes, and advanced modification techniques*, 13–59. Nowy Jork, USA: John Wiley & Sons, Ltd.

104. IW Group (2016). „Grupa robocza Międzynarodowej Agencji Badań nad Rakiem (IARC), tom 117: Pentachlorofenol i niektóre związki pokrewne, Lyon; 4–11 października 2016”, w: IARC monogr. Eval. Carcinog. Risk chem. hum.
105. Jabeen, M., Fayyaz, M. i Irudayaraj, J. (2020). Modyfikacje epigenetyczne oraz zmiany w cyklu komórkowym i ścieżce apoptozy w linii komórkowej raka płuca A549 po ekspozycji na substancje perfluoroalkilowe. *Toxics* 8 (4), 112. doi:10.3390/toxics8040112
106. Jain, R. B. i Ducatman, A. (2019). Selektywne powiązania niskich stężeń substancji perfluoroalkilowych w ostatnim czasie z biomarkerami funkcji wątroby: dane NHANES 2011–2014 dotyczące dorosłych w USA w wieku ≥ 20 lat. *J. Occup. Environ. Med.* 61 (4), 293–302. doi:10.1097/jom.0000000000001532
107. Jalilian, H., Ziaei, M., Weiderpass, E., Rueegg, C. S., Khosravi, Y. i Kjaerheim, K. (2019). Zapadalność na nowotwory i śmiertelność wśród strażaków. *Int. J. cancer* 145 (10), 2639–2646. doi:10.1002/ijc.32199
108. Jeong, K. S., Zhou, J., Griffin, S. C., Jacobs, E. T., Dearmon-Moore, D., Zhai, J., i in. (2018). Zmiany w mikroRNA u strażaków. *J. Occup. Environ. Med.* 60 (5), 469–474. doi:10.1097/jom.0000000000001307
109. Jiang, Q., Gao, H. i Zhang, L. (2015). „Efekty metaboliczne PFAS”, w: *Toxicological effects of perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances*, 177–201. Cham, New Jersey, USA: Humana Press.
110. Jin, C., Sun, Y., Islam, A., Qian, Y. i Ducatman, A. (2011). Kwasy perfluoroalkilowe, w tym sulfonian perfluorooktanu i perfluoroheksan, u strażaków. *J. Occup. Environ. Med.* 53, 324–328. doi:10.1097/jom.0b013e31820d1314
111. Jochyms, Q., Mignard, E. oraz Vincent, J.-M. (2015). Fluorosurfaktanty do zastosowań w katalizie. *J. Fluor. Chem.* 177, 11–18. doi:10.1016/j.jfluchem.2015.01.011
112. Johnson, M. S., Buck, R. C., Cousins, I. T., Weis, C. P. i Fenton, S. E. (2021). *Szacowanie zagrożeń środowiskowych i ryzyka wynikającego z narażenia na substancje per- i polifluoroalkilowe (PFAS): Rezultat spotkania tematycznego skoncentrowanego na SETAC*. Nowy Jork, Stany Zjednoczone: Wiley Online Library.
113. Jones, L., Burgess, J. L., Evans, H. i Lutz, E. A. (2016). Ochrona oddechowa dla strażaków – ocena pojemników CBRN do użytku podczas remontu II: Pobieranie próbek analitu w masce z użyciem zintegrowanej maszyny do oddychania dynamicznego. *J. Occup. Okolica. Hyg.* 13 (3), 177–184. doi:10.1080/15459624.2015.1091964
114. Jones, P. D., Hu, W., De Coen, W., Newsted, J. L. i Giesy, J. P. (2003). Wiązanie perfluorowanych kwasów tłuszczowych z białkami surowicowymi. *Okolica. Toksykol. Chem. An Int. J.* 22 (11), 2639–2649. doi:10.1897/02-553
115. Jones-Otazo, H. A., Clarke, J. P., Diamond, M. L., Archbold, J. A., Ferguson, G., Harner, T. i in. (2005). Czy kurz domowy to brakująca droga ekspozycji na PBDE? Analiza losów miejskich i narażenia ludzi na PBDE. *Środowisko. Sci. Technol.* 39 (14), 5121–5130. Doi:10.1021/es048267b
116. Kang, D., Davis, L. K., Hunt, P. i Kriebel, D. (2008). Występowanie raka wśród mężczyzn strażaków z Massachusetts, 1987–2003. *Am. J. Industrial Med.* 51 (5), 329–335. doi:10.1002/ajim.20549
117. Keir, J. L. A., Akhtar, USA, Matschke, D. M. J., White, P. A., Kirkham, T. L., Chan, H. M. i in. (2020). Policykliczne zanieczyszczenie aromatyczne (PAH) i metali powietrza oraz powierzchni narażonych na emisje spalań podczas awaryjnej gaszenia pożarów: Implikacje

- dla narażenia strażaków. *Całe środowisko naukowe*. 698, 134211. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.134211
118. Kempisty, D. M., i Racz, L. (2021). *Chemikalia na zawsze: Problemy środowiskowe, ekonomiczne i społeczne związane z PFAS w środowisku*. Boca Raton, Floryda: CRC Press.
119. Kempisty, D. M., Xing, Y. i Racz, L. (2016). *Substancje perfluoroalkilowe w środowisku: teoria, praktyka i innowacje*.
120. Kim, S., Thapar, I. i Brooks, B. W. (2021). Zmiany epigenetyczne wywołane przez substancje per- i polifluoroalkilowe (PFAS). *Okolica. Zanieczyszczenia*. 279, 116929. doi:10.1016/j.envpol.2021.116929
121. Kissa, E. (2001). *Fluorowane środki powierzchniowo czynne i odstraszacze*. Boca Raton, Floryda: CRC Press.
122. Kissa, E. (1994). *Fluorowane powierzchniowo czynne, seria naukowa o powierzchniowo czynnych*, 50. Nowy Jork: Marcel Dekker.
123. Knox, S. S., Jackson, T., Javins, B., Frisbee, S. J., Shankar, A. oraz Ducatman, A. M. (2011). Implikacje wczesnej menopauzy u kobiet narażonych na perfluorowęglowodory. *J. Clin. Endokrynol. Metabolism* 96 (6), 1747–1753. doi:10.1210/jc.2010-2401
124. Korzeniowski, S. H., Buck, R. C., Kempisty, D. M. i Pabon, M. (2018). „Fluorosurfaktanty w pianach gaśniczych: przeszłość i teraźniejszość”, w: *Perfluoroalkyl substances in the environment* (Boca Raton, Floryda: CRC Press), 3–34.
125. Kotlarz, N., McCord, J., Collier, D., Lea, C. S., Strynar, M., Lindstrom, A. B., i in. (2020). Pomiar nowych PFAS związanych z wodą pitną we krwi dorosłych i dzieci w Wilmington w Północnej Karolinie. *Environ. Health Perspect.* 128 (7), 077005. doi:10.1289/ehp6837
126. Kwiatkowski, C. F., Andrews, D. Q., Birnbaum, L. S., Bruton, T. A., DeWitt, J. C., Knappe, D. R., i in. (2020). Podstawy naukowe zarządzania PFAS jako klasą chemiczną. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 7 (8), 532–543. doi:10.1021/acs.estlett.0c00255
127. Laitinen, J. A., Koponen, J., Koikkalainen, J. i Kiviranta, H. (2014). Narażenie strażaków na kwasy perfluoroalkilowe i 2-butoksyetanol obecne w pianach gaśniczych. *Toxicol. Lett.* 231 (2), 227–232. doi:10.1016/j.toxlet.2014.09.007
128. Laitinen, J., Mäkelä, M., Mikkola, J. i Huttu, I. (2012). Wieloczynnikowa ocena narażenia strażaków w praktyce. *Toxicol. Lett.* 213 (1), 129–133. doi:10.1016/j.toxlet.2012.06.005
129. Laroche, E. i L'Espérance, S. (2021). Zapadalność na nowotwory i śmiertelność wśród strażaków: przegląd epidemiologicznych przeglądów systematycznych. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 18 (5), 2519. doi:10.3390/ijerph18052519
130. Lau, C., Anitole, K., Hodes, C., Lai, D., Pfahles-Hutchens, A. i Seed, J. (2007). Kwasy perfluoroalkilowe: przegląd ustaleń z zakresu monitoringu i toksykologii. *Toxicol. Sci.* 99 (2), 366–394. doi:10.1093/toxsci/kfm128
131. Leary, D. B., Takazawa, M., Kannan, K. i Khalil, N. (2020). Substancje perfluoroalkilowe a zespół metaboliczny u strażaków: badanie pilotażowe. *J. Occup. Environ. Med.* 62 (1), 52–57. doi:10.1097/jom.0000000000001756
132. Lee, D. J., Koru-Sengul, T., Hernandez, M. N., Caban-Martinez, A. J., McClure, L. A., Mackinnon, J. A., i in. (2020). Ryzyko zachorowania na nowotwory wśród zawodowych strażaków i strażaczek na Florydzie: dane z Rejestru Nowotworów Strażaków na Florydzie (1981-2014). *Am. J. Industrial Med.* 63 (4), 285–299. doi:10.1002/ajim.23086

133. LeMasters, G. K., Genaidy, A. M., Succop, P., Deddens, J., Sobeih, T., Barriera-Viruet, H., i in. (2006). Ryzyko nowotworowe wśród strażaków: przegląd i metaanaliza 32 badań. *J. Occup. Environ. Med.* 48, 1189–1202. doi:10.1097/01.jom.0000246229.68697.90
134. Li, Y., Fletcher, T., Mucs, D., Scott, K., Lindh, C. H., Tallving, P., i in. (2018). Okresy półtrwania PFOS, PFHxS i PFOA po zakończeniu narażenia na zanieczyszczoną wodę pitną. *Occup. Environ. Med.* 75 (1), 46–51. doi:10.1136/oemed-2017-104651
135. Li, Y., Xu, Y., Fletcher, T., Scott, K., Nielsen, C., Pineda, D., i in. (2021). Związki między substancjami perfluoroalkilowymi a hormonami tarczycy po wysokiej ekspozycji poprzez wodę pitną. *Environ. Res.* 194, 110647. doi:10.1016/j.envres.2020.110647
136. Liagkouridis, I., Awad, R., Schellenberger, S., Plassmann, M. M., Cousins, I. T. i Benskin, J. P. (2021). Połączone zastosowanie całkowitego fluoru i utleniającego „odcisku palca” do ilościowego oznaczania polimerów fluorowanych o łańcuchach bocznych w tekstyliach. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 9 (1), 30–36. doi:10.1021/acs.estlett.1c00822
137. Lindstrom, A. B., Strynar, M. J. i Libelo, E. L. (2011). Związki polifluorowane: przeszłość, teraźniejszość i przyszłość. *Środowisko. Sci. Technol.* 45 (19), 7954–7961. doi:10.1021/es2011622
138. Liu, C., Gin, K. Y., Chang, V. W., Goh, B. P. i Reinhard, M. (2011). Nowe perspektywy na bioakumulację PFC – zależność od koncentracji. *Środowisko. Sci. Technol.* 45 (22), 9758–9764. Doi:10.1021/ES202078N
139. Liu, J. i Avendaño, S. M. (2013). Degradacja mikrobiologiczna chemikaliów polifluoroalkilowych w środowisku: przegląd. *Otoczenie. Int.* 61, 98–114. doi:10.1016/j.envint.2013.08.022
140. Lohmann, R., Cousins, I. T., DeWitt, J. C., Gluge, J., Goldenman, G., Herzke, D. i in. (2020). Czy fluoropolimery naprawdę są mało istotne dla zdrowia ludzi i środowiska i oddzielają się od innych PFAS? *Środowisko. Sci. Technol.* 54 (20), 12820–12828. doi:10.1021/acs.est.0c03244
141. Lu, Y., Chan, Y.-T., Tan, H.-Y., Li, S., Wang, N. i Feng, Y. (2020). Regulacja epigenetyczna w leczeniu nowotworów ludzkich: Potencjalna rola epi-leku w terapii nowotworów. *Mol. cancer* 19 (1), 79–16. doi:10.1186/s12943-020-01197-3
142. Lu, Y., Meng, L., Ma, D., Cao, H., Liang, Y., Liu, H. i in. (2021). Występowanie PFAS w ludzkim łożysku i ich zdolności wiązania z ludzką albuminą w surowicy i organicznym transporterem anionów 4. *Okolica. Zanieczyszczenia.* 273, 116460. doi:10.1016/j.envpol.2021.116460
143. Mahltig, B. (2015). "13 - hydrofobowe i oleofobowe wykończenia dla tekstyliów," w *Funkcjonalne wykończenia tekstyliów*. Redaktor R. Paul (Sawston, Wielka Brytania: Woodhead Publishing), 387–428.
144. Mandal, S., Mazumder, N.-U.-S., Agnew, R. J., Song, G. i Li, R. (2021). Charakterystyka i modelowanie termicznie ochronnej i termofizjologicznej wydajności materiałów tekstylnych – przegląd. *Materiały* 14 (9), 2397. doi:10.3390/MA14092397
145. Marmur, A. (2006). Kontakt miękkiej: pomiar i interpretacja kątów styku. *Soft Matter* 2 (1), 12–17. DOI:10.1039/b514811c
146. Mastrantonio, M., Bai, E., Uccelli, R., Cordiano, V., Screpanti, A. i Crosignani, P. (2018). Zanieczyszczenie wody pitnej przez substancje perfluoroalkilowe (PFAS): Badanie śmiertelności ekologicznej w regionie Veneto, Włochy. *Eur. J. Public Health* 28 (1), 180–185. doi:10.1093/eurpub/ckx066

147. Mayer, A. C., Fent, K. W., Bertke, S., Horn, G. P., Smith, D. L., Kerber, S. i in. (2019). Zanieczyszczenie okapu strażackiego: Efektywność prania w celu usunięcia PAH i FR. *J. Occup. Okolica. Hyg.* 16 (2), 129–140. doi:10.1080/15459624.2018.1540877
148. Mazumder, N.-USA-S. (2021). *Charakterystyka wytrzymałości na rozciąganie tkanin warstw zewnętrznych używanych w odzieży ochronnej strażaków pod wpływem promieniowania ciepła*. Stillwater, OK, Stany Zjednoczone: Oklahoma State University.
149. Mazumder, N.-U.-S., Mandal, S., Agnew, R. J., Petrova, A., Boorady, L. M. i Song, G. (2022). Charakterystyka wytrzymałości na rozciąganie tkanin używanych w sprzęcie bunkrów strażaków pod promieniowaniem ciepła. *Polimery* 14 (2), 296. doi:10.3390/polym14020296
150. Mazumder, N. U. S. i Islam, M. T. (2021). „Wykończenia ognioodporne włókien tekstylnych”, w: *Innovative and emerging technologies for textile dyeing and finishing*, 373–405. Nowy Jork, USA: John Wiley & Sons, Ltd.
151. McGuire, M. E., Schaefer, C., Richards, T., Backe, W. J., Field, J. A., Houtz, E., i in. (2014). Dowody na wywołane rekultywacją zmiany w rozmieszczeniu podpowierzchniowych substancji poli- i perfluoroalkilowych na terenie dawnego poligonu szkoleniowego straży pożarnej. *Environ. Sci. Technol.* 48 (12), 6644–6652. doi:10.1021/es5006187
152. Meegoda, J. N., Kewalramani, J. A., Li, B. i Marsh, R. W. (2020). Przegląd zastosowań, uwalniania do środowiska oraz technologii usuwania substancji per- i polifluoroalkilowych. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 17 (21), 8117. doi:10.3390/ijerph17218117
153. Moody, C. A. i Field, J. A. (2000). Surfaktanty perfluorowane i środowiskowe konsekwencje ich stosowania w pianach gaśniczych. *Environ. Sci. Technol.* 34 (18), 3864–3870. doi:10.1021/es991359u
154. Moya, J., Phillips, L., Schuda, L., Wood, P., Diaz, A., Lee, R., i in. (2011). *Podręcznik czynników narażenia*: wydanie 2011. Waszyngton, D.C., USA: Agencja Ochrony Środowiska USA (EPA).
155. Muegge, C. M., Zollinger, T. W., Song, Y., Wessel, J., Monahan, P. O. i Moffatt, S. M. (2018). Nadmierna śmiertelność wśród strażaków z Indiany, 1985–2013. *Am. J. Industrial Med.* 61 (12), 961–967. doi:10.1002/ajim.22918
156. Muensterman, D. J., Titaley, I. A., Peaslee, G. F., Minc, L. D., Cahuas, L., Rodowa, A. E., i in. (2021). Rozmieszczenie fluoru na nowym strażackim ubraniu specjalnym. Waszyngton, DC: Environmental Science & Technology. [Google Scholar](#)
157. Nadal, M., oraz Domingo, J. L. (2014). Poziom pyłu wewnątrz perfluoroalkilowych substancji (PFAS) i rola spożycia jako drogi ekspozycji: przegląd. *Curr. Org. Chem.* 18 (17), 2200–2208. doi:10.2174/1385272819666140804230713
158. Nelson, J. W., Hatch, E. E. i Webster, T. F. (2010). Narażenie na polifluoroalkilowe chemikalia i cholesterol, masa ciała oraz insulinooporność w ogólnej populacji USA. *Środowisko. Perspektywa zdrowia.* 118 (2), 197–202. Doi:10.1289/ehp.0901165
159. OECD (2009). *Analiza danych dotyczących identyfikacji korelacji między cechami polimerów a potencjalnym zagrożeniem zdrowotnym lub ekotoksykologicznym*. Paryż: Organizacja Współpracy Gospodarczej i Rozwoju.
160. OECD (2021). *Pogodzenie terminologii wszechświata substancji per- i polifluoroalkilowych: Zalecenia i praktyczne wskazówki*. [Online]. Paryż, Francja: OECD.

Dostępne: [https://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV/CBC/MONO\(2021\)25&docLanguage=En](https://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV/CBC/MONO(2021)25&docLanguage=En) (Dostęp 23 maja 2022).

161. OECD (2018). W kierunku nowej, kompleksowej globalnej bazy danych substancji per-i polyfluoroalkilowych (PFAS): Raport podsumowujący dotyczący aktualizacji listy OECD z 2007 roku dotyczącej substancji per-i polyfluoroalkilowych (PFAS). Paryż: Organizacja Współpracy Gospodarczej i Rozwoju (OECD).
162. Ojo, A. F., Peng, C., i Ng, J. C. (2020). Połączone efekty i interakcje toksykologiczne mieszanin substancji perfluoroalkilowych i polifluoroalkilowych w ludzkich komórkach wątroby (HepG2). *Okolica. Zanieczyszczenia*. 263, 114182. doi:10.1016/j.envpol.2020.114182
163. Ojo, A. F., Xia, Q., Peng, C. i Ng, J. C. (2021). Ocena indywidualnej i łącznej toksyczności substancji perfluoroalkilowych dla ludzkich komórek wątroby z wykorzystaniem biomarkerów stresu oksydacyjnego. *Chemosphere* 281, 130808. doi:10.1016/j.chemosphere.2021.130808
164. Oliveira, M., Slezakova, K., Alves, M. J., Fernandes, A., Teixeira, J. P., Delerue-Matos, C. i in. (2017). Policykliczne węglowodory aromatyczne w remizach: monitorowanie ekspozycji strażaków i biomonitoring oraz ocena wkładu w całkowitą dawkę wewnętrzną. *J. Hazard. Mater.* 323, 184–194. doi:10.1016/j.jhazmat.2016.03.012
165. Olsen, G. W., Mair, D. C., Lange, C. C., Harrington, L. M., Church, T. R., Goldberg, C. L. i in. (2017). Substancje per-i polifluoroalkilowe (PFAS) u dorosłych dawców krwi Amerykańskiego Czerwonego Krzyża, 2000–2015. *Okolica. Res.* 157, 87–95. doi:10.1016/j.envres.2017.05.013
166. Pabon, M., i Corpart, J. (2002). Fluorowane substancje powierzchniowo czynne: synteza, właściwości, oczyszczanie ścieków. *J. Fluor. Chem.* 114 (2), 149–156. doi:10.1016/s0022-1139(02)00038-6
167. Panieri, E., Baralic, K., Djukic-Cosic, D., Buha Djordjevic, A., oraz Saso, L. (2022). Cząsteczki PFAS: To poważny problem dla zdrowia człowieka i środowiska. *Toksyny* 10 (2), 44. doi:10.3390/toxics10020044
168. Peaslee, G. F., Wilkinson, J. T., McGuinness, S. R., Tighe, M., Caterisano, N., Lee, S. i in. (2020). Inna ścieżka ekspozycji strażaków na substancje per-i polifluoroalkilowe to tekstylia strażaków. *Środowisko. Sci. Technol. Lett.* 7 (8), 594–599. doi:10.1021/acs.estlett.0c00410
169. Peshoria, S., Nandini, D., Tanwar, R. i Narang, R. (2020). Krótkołańcuchowe i długołańcuchowe fluorosurfaktanty w pianie gaśniczej: przegląd. *Environ. Chem. Lett.* 18 (4), 1277–1300. doi:10.1007/s10311-020-01015-8
170. Phan, L. M., Yeung, S.-C. J. i Lee, M.-H. (2014). Przeprogramowanie metaboliczne nowotworów: znaczenie, główne cechy i potencjał precyzyjnych, celowanych terapii antynowotworowych. *Cancer Biol. Med.* 11 (1), 1–19. doi:10.7497/j.issn.2095-3941.2014.01.001
171. Pizzurro, D. M., Seeley, M., Kerper, L. E. i Beck, B. D. (2019). Różnice międzygatunkowe w toksykokinetyce substancji perfluoroalkilowych (PFAS) i ich zastosowanie w kryteriach zdrowotnych. *Regul. Toxicol. Pharmacol.* 106, 239–250. doi:10.1016/j.yrtph.2019.05.008

172. Place, B. J. i Field, J. A. (2012). Identyfikacja nowych substancji fluorochemicznych w wodnych pianach tworzących film (AFFF) stosowanych przez armię USA. *Environ. Sci. Technol.* 46 (13), 7120–7127. doi:10.1021/es301465n
173. Plumlee, M. H., McNeill, K. i Reinhard, M. (2009). Pośrednia fotoliza związków perfluorochemicznych: utlenianie octanu N-etyloperfluorooktanosulfonamidu (N-EtFOSAA) i innych perfluoroalkanosulfonamidów inicjowane przez rodnik hydroksylowy. *Environ. Sci. Technol.* 43 (10), 3662–3668. doi:10.1021/es803411w
174. Poothong, S., Papadopoulou, E., Padilla-Sánchez, J. A., Thomsen, C. i Haug, L. S. (2020). Wiele dróg narażenia ludzi na substancje poli- i perfluoroalkilowe (PFAS): od narażenia zewnętrznego do krwi ludzkiej. *Environ. Int.* 134, 105244. doi:10.1016/j.envint.2019.105244
175. Porter, M. R. (2013). *Handbook of surfactants* (Podręcznik środków powierzchniowo czynnych). Berlin, Niemcy: Springer.
176. Posner, S. (2012). „Związki perfluorowane: występowanie i zastosowanie w produktach”, w: *Polyfluorinated chemicals and transformation products* (Berlin, Niemcy: Springer), 25–39.
177. Post, G. B., Cohn, P. D. i Cooper, K. R. (2012). Kwas perfluorooktanowy (PFOA), pojawiające się zanieczyszczenie wody pitnej: krytyczny przegląd najnowszej literatury. *Environ. Res.* 116, 93–117. doi:10.1016/j.envres.2012.03.007
178. Program, N. T. (2020). Raport techniczny NTP dotyczący badań toksykologicznych i kancerogenności kwasu perfluorooktanowego (CASRN 335-67-1) podawanego w paszy szczurom Sprague Dawley (Hsd: Sprague Dawley® SD®). NC, USA: Departament Zdrowia i Opieki Społecznej USA.
179. Ragnarsdóttir, O., Abdallah, M. A.-E. i Harrad, S. (2022). Wchłanianie przez skórę: ważna droga narażenia ludzi na substancje perfluoroalkilowe? *Environ. Pollut.* 307, 119478. doi:10.1016/j.envpol.2022.119478
180. Rankin, K. (2015). *Polimery akrylanowe na bazie fluorotelomerów jako pośrednie źródło karboksylanów perfluoroalkilowych*. Toronto, ON M5S, Kanada: Uniwersytet w Toronto.
181. Rankin, K., Lee, H., Tseng, P. J. i Mabury, S. A. (2014). Badanie biodegradowalności polimeru akrylanowego na bazie fluorotelomeru w mikrokosmosie gleba-roślina za pomocą analizy pośredniej i bezpośredniej. *Environ. Sci. Technol.* 48 (21), 12783–12790. doi:10.1021/es502986w
182. Rewerts, J. N., Morré, J. T., Massey Simonich, S. L. i Field, J. A. (2018). Ekstrakcja w fiolce i chromatografia gazowa o dużej objętości z metodą spektrometrii mas do analizy lotnych PFAS w papierze i tekstyliach. *Environ. Sci. Technol.* 52 (18), 10609–10616. doi:10.1021/acs.est.8b04304
183. Rickard, B. P., Rizvi, I. i Fenton, S. E. (2022). Substancje per- i polifluoroalkilowe (PFAS) a wyniki rozrodcze u kobiet: eliminacja PFAS, efekty mediowane przez układ dokrewny i choroby. *Toxicology* 465, 153031. doi:10.1016/j.tox.2021.153031
184. Rizzuto, P. (2020). Starsze PFAS, które EPA uważała za przestarzałe, wciąż w użyciu – poinformowano Agencję [Online]. Dostępne na: <https://news.bloomberglaw.com/environment-and-energy/older-pfas-that-epa-thought-obsolete-still-used-agency-told> (Dostęp: 15 grudnia 2022).

185. Robel, A. E., Marshall, K., Dickinson, M., Lunderberg, D., Butt, C., Peaslee, G., i in. (2017). Domknięcie bilansu masy fluoru w papierze i tekstyliach. *Environ. Sci. Technol.* 51 (16), 9022–9032. doi:10.1021/acs.est.7b02080
186. Rosenfeld, P. E., Spaeth, K. R., Remy, L. L., Byers, V., Muerth, S. A., Hallman, R. C., i in. (2023). Narażenie na substancje perfluoroalkilowe u strażaków: źródła i implikacje. *Environ. Res.* 220, 115164. doi:10.1016/j.envres.2022.115164
187. Rossbach, B., Niemietz, A., Kegel, P. i Letzel, S. (2014). Pobór i eliminacja permetryny związana z używaniem odzieży impregnowanej permetryną przez pracowników leśnych. *Toxicol. Lett.* 231 (2), 147–153. doi:10.1016/j.toxlet.2014.10.017
188. Rotander, A., Toms, L.-M. L., Aylward, L., Kay, M. i Mueller, J. F. (2015). Podwyższone poziomy PFOS i PFHxS u strażaków narażonych na wodną pianę tworzącą film (AFFF). *Environ. Int.* 82, 28–34. doi:10.1016/j.envint.2015.05.005
189. Roth, K., Imran, Z., Liu, W. i Petriello, M. C. (2020). Dieta jako źródło narażenia i mediator toksyczności substancji per- i polifluoroalkilowych (PFAS). *Front. Toxicol.* 2, 601149. doi:10.3389/ftox.2020.601149
190. Russell, M. H., Berti, W. R., Szostek, B. i Buck, R. C. (2008). Badanie potencjału biodegradacji produktu polimeru fluoroakrylanowego w glebach tlenowych. *Environ. Sci. Technol.* 42 (3), 800–807. doi:10.1021/es0710499
191. Sayed, U. i Dabhi, P. (2014). „Wykańczanie tekstyliów za pomocą fluorowęglowodorów”, w: *Waterproof and water repellent textiles and clothing* (Amsterdam, Holandia: Elsevier), 139–152.
192. Schellenberger, S., Gillgard, P., Stare, A., Hanning, A., Levenstam, O., Roos, S., i in. (2018). Twarzą w twarz z deszczem po wycofaniu: ocena wydajności alternatywnych fluorowanych i niefluorowanych trwałych środków hydrofobowych dla tkanin outdoorowych. *Chemosphere* 193, 675–684. doi:10.1016/j.chemosphere.2017.11.027
193. Schellenberger, S., Jonsson, C., Mellin, P., Levenstam, O. A., Liagkouridis, I., Ribbenstedt, A. i in. (2019). Uwalnianie mikroplastikowych włókien zawierających polimery zawierające łańcuchy boczne z tekstyliów funkcjonalnych podczas prania oraz pierwsze szacunki emisji kwasu perfluoroalkilowego. *Środowisko. Sci. Technol.* 53 (24), 14329–14338. doi:10.1021/acs.est.9b04165
194. Schroeder, T., Bond, D. i Foley, J. (2021). Zanieczyszczenie gleby i wód gruntowych PFAS poprzez przemysłowe emisje powietrzne oraz osadzanie gruntów w południowo-zachodnim Vermont i wschodnim stanie Nowy Jork, USA. *Środowisko. Proces naukowy. Uderzenia* 23 (2), 291–301. Doi:10.1039/d0em00427h
195. Schultes, L., Peaslee, G. F., Brockman, J. D., Majumdar, A., McGuinness, S. R., Wilkinson, J. T. i in. (2019). Łączne pomiary fluoru w opakowaniach spożywczych: Jak sprawdzają się obecne metody? *Środowisko. Sci. Technol. Lett.* 6 (2), 73–78. doi:10.1021/acs.estlett.8b00700
196. Shaid, A., Wang, L. i Padhye, R. (2018). "Tekstylia do odzieży ochronnej przeciwpożarowej", w *Firefighters' clothing and equipment* (Floryda, Stany Zjednoczone: CRC Press), 1–30.
197. Shane, H. L., Baur, R., Lukomska, E., Weatherly, L. i Anderson, S. E. (2020). Immunotoksyczność i potencjał alergiczny wywołane miejscowym zastosowaniem kwasu perfluoroktanowego (PFOA) w modelu myszym. *Chemia żywności. Toksykol.* 136, 111114. doi:10.1016/j.fct.2020.111114

198. Shaw, S. D., Berger, M. L., Harris, J. H., Yun, S. H., Wu, Q., Liao, C. i in. (2013). Trwałe zanieczyszczenia organiczne, w tym polichlorowane i polibromowane dibenzo-p-dioksyny oraz dibenzofurany u strażaków z północnej Kalifornii. *Chemosphere* 91 (10), 1386–1394. doi:10.1016/j.chemosphere.2012.12.070
199. Shen, B., Whitehead, T. P., McNeel, S., Brown, F. R., Dhaliwal, J., Das, R. i in. (2015). Wysokie stężenie polibromowanych eterów difenylowych w pyłu z odkurzacza z kalifornijskich remiz. *Środowisko. Sci. Technol.* 49 (8), 4988–4994. DOI:10.1021/ES505463g
200. Shibuichi, S., Yamamoto, T., Onda, T. i Tsujii, K. (1998). Powierzchnie super odporne na wodę i olej, powstałe w wyniku struktury fraktalnej. *J. Colloid Interface Sci.* 208 (1), 287–294. doi:10.1006/jcis.1998.5813
- Shinde, A., oraz Ormond, R. B. (2021). Chromatograf masowy do próbkowania w przestrzeni głowy jako metoda przesiewania termicznie zanieczyszczeń z pożaru z wycofanych kurtek przeciwpożarowych. *Fire Mater.* 45 (3), 415–428. doi:10.1002/fam.2887
201. Shoeib, M., Harner, T., Webster, G. M. i Lee, S. C. (2011). Wewnętrzne źródła związków poli- i perfluorowanych (PFCS) w Vancouver, Kanada: Implikacje dla narażenia ludzi. *Środowisko. Sci. Technol.* 45 (19), 7999–8005. DOI:10.1021/ES103562V
202. Shoeib, M., Harner, T., Wilford, B. H., Jones, K. C. i Zhu, J. (2005). Perfluorowane sulfonamidy w powietrzu wewnętrznym i zewnętrznym oraz pyłu wewnętrznego: występowanie, podziały i narażenie człowieka. *Środowisko. Sci. Technol.* 39 (17), 6599–6606. Doi:10.1021/es048340y
203. Silver, G., Krastev, Y., Forbes, M. K., Hamdorf, B., Lewis, B., Tisbury, M. i in. (2021). Protokół badania randomizowanego kontrolowanego badania badającego wpływ dawstwa krwi i osocza na poziomy surowicy perfluoroalkilu i substancji polifluoroalkilowych (PFAS) u strażaków. *BMJ open* 11 (5), e044833. doi:10.1136/bmjopen-2020-044833
204. Simons, J. (1949). Produkcja fluorowęglowodorów. *Electrochem. Soc. J.* 95, 47. doi:10.1149/1.2776733
205. Sjogren, P., Montse, R., Lampa, E., Salihovic, S., van Bavel, B., Lind, L., i in. (2016). Poziomy krążących substancji perfluoroalkilowych są powiązane z wzorcami żywieniowymi – badanie przekrojowe u starszych Szwedów i Szwedek. *Environ. Res.* 150, 59–65. doi:10.1016/j.envres.2016.05.016
206. Smart, B. (1994). „Charakterystyka układów C-F w chemii organofluorowej: zasady i zastosowania komercyjne”. Redaktorzy: R. E. Banks, B. E. Smart i C. Tatlow (Nowy Jork: Plenum Press). [Google Scholar].
207. Song, G. i Lu, Y. (2013). „Tekstylia ognioodporne do gaszenia pożarów strukturalnych i w pobliżu ognia”, w: *Handbook of fire resistant textiles* (Amsterdam, Holandia: Elsevier), 520–548.
208. Soteriades, E. S., Kim, J., Christophi, C. A. oraz Kales, S. N. (2019). Częstość występowania i śmiertelność nowotworów wśród strażaków: nowoczesny przegląd i metaanaliza. *Asian Pac. J. Cancer Prev. APJCP* 20 (11), 3221–3231. doi:10.31557/apjcp.2019.20.11.3221
209. Stapleton, H. M., Eagle, S., Sjödin, A. i Webster, T. F. (2012). PBDE w surowicy w kohorcie maluchów z Karoliny Północnej: Powiązania z chusteczkami, kurzem domowym

- i zmiennymi społeczno-ekonomicznymi. *Środowisko. Perspektywa zdrowia*. 120 (7), 1049–1054. Doi:10.1289/ehp.1104802
210. Steenland, K., Fletcher, T., Stein, C. R., Bartell, S. M., Darrow, L., Lopez-Espinosa, M.-J. i in. (2020). Przegląd: Ewolucja dowodów dotyczących PFOA i zdrowia po ocenach C8 Science Panel. *Otoczenie. Int.* 145, 106125. doi:10.1016/j.envint.2020.106125
 211. Steenland, K., Tinker, S., Frisbee, S., Ducatman, A. i Vaccarino, V. (2009). Związek kwasu perfluoroktanowego i perfluorooktanowego sulfonianu z lipidami surowicy u dorosłych żyjących w pobliżu zakładu chemicznego. *Am. J. Epidemiol.* 170 (10), 1268–1278. doi:10.1093/aje/kwp279
 212. Steenland, K. i Winqvist, A. (2021). PFAS i rak, przegląd dowodów epidemiologicznych. *Okolica. Res.* 194, 110690. doi:10.1016/j.envres.2020.110690
 213. Substancje, A. f. T. i Registry, D. (2021). *Profil toksykologiczny perfluoroalkilów*. Atlanta, GA: Departament Zdrowia i Opieki Społecznej USA. Public Health Service.
 214. Sunderland, E. M., Hu, X. C., Dassuncao, C., Tokranov, A. K., Wagner, C. C. i Allen, J. G. (2019). Przegląd ścieżek narażenia ludzi na substancje poli- i perfluoroalkilowe (PFAS) oraz przedstawienie informacji o skutkach zdrowotnych. *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.* 29 (2), 131–147. doi:10.1038/s41370-018-0094-1
 215. Tansel, B. (2022). Zastosowanie PFAS w produktach elektronicznych i ryzyko narażenia podczas obsługi i przetwarzania elektroodpadów: przegląd. *J. Environ. Zarządzaj.* 316, 115291. doi:10.1016/j.jenvman.2022.115291
 216. Tao, L., Kannan, K., Aldous, K. M., Mauer, M. P. i Eadon, G. A. (2008). Biomonitoring perfluorochemikaliów w osoczu personelu stanu Nowy Jork reagującego na katastrofę w World Trade Center. *Środowisko. Sci. Technol.* 42 (9), 3472–3478. doi:10.1021/es8000079
 217. Taylor, C. K. (1999). W praktyce fluorowane powierzchniowo czynne. *Annu. Surfaktanty Rev.* 2, 271–316.
 218. Tefera, Y. M., Gaskin, S., Mitchell, K., Springer, D., Mills, S. i Pisaniello, D. (2022). Żywność uprawiana na remizach jako potencjalna droga narażenia strażaków na substancje per- i poli-fluoroalkilowe (PFAS). *Otoczenie. Int.* 168, 107455. doi:10.1016/j.envint.2022.107455
 219. Temkin, A. M., Hocevar, B. A., Andrews, D. Q., Naidenko, O. V. oraz Kamendulis, L. M. (2020). Zastosowanie kluczowych cech rakotwórczych do per i polifluoroalkilowych substancji. *Int. J. Environ. Res. public health* 17 (5), 1668. doi:10.3390/ijerph17051668
 220. Tian, M., Peng, S., Martin, F. L., Zhang, J., Liu, L., Wang, Z. i in. (2012). Kwas perfluorooktanowy indukuje hipermetylację promotora genu glutation-S-transferazy Pi w ludzkich komórkach wątroby L02. *Toxicology* 296 (1-3), 48–55. doi:10.1016/j.tox.2012.03.003
 221. Tonnelier, A., Coecke, S. i Zaldívar, J.-M. (2012). Skrining chemikaliów pod kątem potencjału bioakumulacji u ludzi za pomocą modelu toksykokinetycznego opartego na fizjologii. *Archives Toxicol.* 86 (3), 393–403. doi:10.1007/s00204-011-0768-0
 222. Trowbridge, J., Gerona, R. R., Lin, T., Rudel, R. A., Bessonneau, V., Buren, H., i in. (2020). Narażenie na substancje perfluoroalkilowe w kohorcie strażaczek i pracowników biurowych w San Francisco. *Environ. Sci. Technol.* 54 (6), 3363–3374. doi:10.1021/acs.est.9b05490
 223. Trudel, D., Horowitz, L., Wormuth, M., Scheringer, M., Cousins, I. T. i Hungerbühler, K. (2008). Szacowanie narażenia konsumentów na PFOS i PFOA. *Risk Analysis An Int. J.* 28 (2), 251–269. doi:10.1111/j.1539-6924.2008.01017.x

224. van der Veen, I., Hanning, A.-C., Stare, A., Leonards, P. E. G., de Boer, J. i Weiss, J. M. (2020). Wpływ wietrzenia na substancje per- i polifluoroalkilowe (PFAS) z odzieży o trwałej hydrofobowości (DWR). *Chemosphere* 249, 126100. doi:10.1016/j.chemosphere.2020.126100
225. van der Veen, I., Schellenberger, S., Hanning, A.-C., Stare, A., de Boer, J., Weiss, J. M., i in. (2022). Los substancji per- i polifluoroalkilowych z odzieży o trwałej hydrofobowości (DWR) podczas użytkowania. Waszyngton, DC: Environmental Science & Technology.
226. Vaughn, B., Andrea, W. i Kyle, S. (2013). Narażenie na kwas perfluorooktanowy (PFOA) a zachorowalność na nowotwory wśród dorosłych mieszkających w pobliżu zakładu chemicznego. *Environ. Health Perspect.* 121 (11-12), 1313–1318. doi:10.1289/ehp.1306615
227. Vieira Verónica, M., Kate, H., Shin, H.-M., Weinberg Janice, M., Webster Thomas, F. i Tony, F. (2013). Narażenie na kwas perfluorooktanowy a wyniki leczenia nowotworów w zanieczyszczonej społeczności: analiza geograficzna. *Environ. Health Perspect.* 121 (3), 318–323. doi:10.1289/ehp.1205829
228. von Ehrenstein, O. S., Fenton, S. E., Kato, K., Kuklenyik, Z., Calafat, A. M. i Hines, E. P. (2009). Substancje polifluoroalkilowe w surowicy i mleku kobiet karmiących piersią. *Reprod. Toxicol.* 27 (3-4), 239–245. doi:10.1016/j.reprotox.2009.03.001
229. Wang, F., Liu, W., Ma, J., Yu, M., Jin, Y. i Dai, J. (2012). Narażenie prenatalne i neonatalne na kwas perfluorooktanosulfonowy powoduje zmiany w profilach ekspresji miRNA i białkach związanych z synapsami w rozwijających się mózgach szczurów. *Environ. Sci. Technol.* 46 (12), 6822–6829. doi:10.1021/es3008547
230. Wang, H., Du, H., Yang, J., Jiang, H., Karmin, O., Xu, L., i in. (2019). PFOS, PFOA, homeostaza estrogenów i wielkość urodzeniowa u chińskich niemowląt. *Chemosphere* 221, 349–355. doi:10.1016/j.chemosphere.2019.01.061
231. Wang, J., Mao, G., Ober, C. K. i Kramer, E. J. (1997). Kopolimery blokowe z semifluorowanymi grupami bocznymi o strukturze ciekłokrystalicznej, stabilnymi powierzchniami o niskiej energii: synteza, struktura ciekłokrystaliczna i krytyczne napięcie powierzchniowe. *Macromolecules* 30 (7), 1906–1914. doi:10.1021/ma961412o
232. Wang, Y., Zhang, L., Teng, Y., Zhang, J., Yang, L., Li, J., i in. (2018). Związek między poziomem substancji perfluoroalkilowych w surowicy a cukrzycą ciążową i poporodowym poziomem glukozy we krwi. *J. Environ. Sci.* 69, 5–11. doi:10.1016/j.jes.2018.03.016
233. Wang, Z., Cousins, I. T., Scheringer, M., Buck, R. C. i Hungerbühler, K. (2014). Globalne inwentaryzacje emisji dla homologów kwasu perfluoroalkilokarboksylowego (PFCA) C4–C14 od 1951 do 2030 r., część II: pozostałe elementy układanki. *Environ. Int.* 69, 166–176. doi:10.1016/j.envint.2014.04.006
234. Wang, Z., DeWitt, J. C., Higgins, C. P. i Cousins, I. T. (2017). Nigdy nie kończąca się historia substancji per- i polifluoroalkilowych (PFAS)? Waszyngton, DC: Environmental Science & Technology.
235. Washington, J. W. i Jenkins, T. M. (2015). Abiotyczna hydroliza polimerów na bazie fluorotelomerów jako źródło perfluorokarboksylanów w skali globalnej. *Environ. Sci. Technol.* 49 (24), 14129–14135. doi:10.1021/acs.est.5b03686
236. Washington, J. W., Jenkins, T. M., Rankin, K. oraz Naile, J. E. (2015). Degradacja komercyjnych, bocznych polimerów opartych na fluorotelomerach na skalę dekad, w glebach i wodzie. *Środowisko. Sci. Technol.* 49 (2), 915–923. DOI:10.1021/ES504347U

237. Water, Z. D. (2012). *Trwała chemia odpychająca wodę i glebę w przemyśle tekstylnym – raport badawczy [online]*. Dostępne na: https://uploads-ssl.webflow.com/5c4065f2d6b53e08a1b03de7/5db6eece578efb688bee2bed_DWR_Report.pdf (Dostęp 15 grudnia 2022).
238. Weatherly, L. M., Shane, H. L., Lukomska, E., Baur, R. i Anderson, S. E. (2021). Toksyczność systemowa wywołana przez miejscowe zastosowanie kwasu heptafluorobutyrowego (PFBA) w modelu mysim. *Chemia żywności. Toksykol.* 156, 112528. doi:10.1016/j.fct.2021.112528
239. Wielsøe, M., Long, M., Ghisari, M., oraz Bonefeld-Jørgensen, E. C. (2015). Substancje perfluoroalkilowane (PFAS) wpływają na biomarkery stresu oksydacyjnego *in vitro*. *Chemosphere* 129, 239–245. doi:10.1016/j.chemosphere.2014.10.014
240. Wikström, S., Lin, P.-I., Lindh, C. H., Shu, H. oraz Bornehag, C.-G. (2020). Poziomy perfluoroalkilowych substancji w surowicy matki we wczesnej ciąży i masie urodzeniowej potomstwa. *Pediatrics. Res.* 87 (6), 1093–1099. doi:10.1038/s41390-019-0720-1
241. Winkens, K., Koponen, J., Schuster, J., Shoeib, M., Vestergren, R., Berger, U. i in. (2017). Kwasy perfluoroalkilowe i ich prekursorzy w powietrzu pośrodku wewnątrz pobieranych w pokojach dziecięcych. *Okolica. Zanieczyszczenia.* 222, 423–432. doi:10.1016/j.envpol.2016.12.010
242. Wong, F., MacLeod, M., Mueller, J. F. i Cousins, I. T. (2014). Zwiększona eliminacja kwasu perfluoroktanowego sulfonowego przez kobiety menstruujące: dowody z modelowania farmakokinetycznego opartego na populacji. *Środowisko. Sci. Technol.* 48 (15), 8807–8814. Doi:10.1021/es500796y
243. Xu, Y., Nielsen, C., Li, Y., Hammarstrand, S., Andersson, E. M., Li, H. i in. (2021). Substancje perfluoroalkilowe w surowicy u mieszkańców po długotrwałym skażeniu wody pitnej pianą gaśniczą w Ronneby w Szwecji. *Otoczenie. Int.* 147, 106333. doi:10.1016/j.envint.2020.106333
244. Young, A. S., Sparer-Fine, E. H., Pickard, H. M., Sunderland, E. M., Peaslee, G. F. i Allen, J. G. (2021). Substancje per-i polifluoroalkilowe (PFAS) oraz całkowity fluor w pyłe strażackim. *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.* 31 (5), 930–942. doi:10.1038/s41370-021-00288-7
245. Yu, N., Wei, S., Li, M., Yang, J., Li, K., Jin, L. i in. (2016). Wpływ kwasu perfluoroktanowego na profile metaboliczne w mózgu i wątrobie myszy ujawnione przez wysokoprzepustowe podejście metabolomiki ukierunkowanej. *Sci. Rep.* 6 (1), 23963. doi:10.1038/srep23963
246. Zhao, P., Xia, X., Dong, J., Xia, N., Jiang, X., Li, Y. i in. (2016). Krótkołańcuchowe i długołańcuchowe substancje perfluoroalkilowe w wodzie, zawieszone cząstki oraz powierzchniowe osady mętnej rzeki. *Nauka ścisła. Całkowite środowisko.* 568, 57–65. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.05.221
247. Zhou, J., Jenkins, T. G., Jung, A. M., Jeong, K. S., Zhai, J., Jacobs, E. T. i in. (2019). Metylacja DNA wśród strażaków. *PLoS One* 14 (3), e0214282. doi:10.1371/journal.pone.0214282

Przetłumaczone przez AI.

<https://www.frontiersin.org/journals/materials/articles/10.3389/fmats.2023.1143411/full>