

Tomasz Krasowski

*Decontex Polska*

*Corresponding author / Autor korespondencyjny: tomasz@decontex.pl*

## Cleaning and Decontamination of Firefighters' Protective Clothing in Liquid Carbon Dioxide (LCO<sub>2</sub>) – Literature Review and Conclusions for National Practice

### Czyszczenie i dekontaminacja odzieży ochronnej strażaków w ciekłym ditlenku węgla (LCO<sub>2</sub>) – analiza literaturowa i wnioski dla praktyki krajowej

#### ABSTRACT

**Aim:** The aim of this work is to provide a synthetic assessment of the effectiveness of available technologies for cleaning and decontaminating firefighters' protective clothing, with particular emphasis on processes carried out in liquid carbon dioxide (LCO<sub>2</sub>). The article also demonstrates their impact on user safety and material durability.

**Methodology:** A systematic review of literature from 2018 to 2024 was conducted, covering scientific publications, technical reports and normative documents on the cleaning and decontamination of firefighters' protective clothing. The search was conducted in the Scopus, ScienceDirect and PubMed databases and in technical report repositories (UL Solutions, Centexbel, Ghent University), using combinations of keywords related to chemical contaminants (WWA, SVOC, heavy metals), microbiological contaminants (biofilm) and cleaning processes (water washing, hydrocarbon cleaning, LCO<sub>2</sub>). In the analysis, only studies containing quantitative data or detailed descriptions of cleaning process parameters and tests assessing the impact of cleaning on material properties, such as durable water repellency (DWR), fibre integrity and mechanical parameters, were included.

The review covers the results of studies conducted by leading research centres (Centexbel, UL Solutions, Ghent University, North Carolina State University) and an analysis of the requirements of ISO 23616, NFPA 1851 and PN-EN 469 standards in terms of cleaning effectiveness, process validation and maintenance of the functional properties of firefighters' protective clothing.

**Conclusions:** The review allows for a comparison of the effectiveness of cleaning and decontamination technologies for firefighters' protective clothing and identifies their limitations in terms of user safety and material durability. The collected data clearly indicates that water-based technologies often do not provide complete chemical and biological decontamination and may also accelerate the degradation of the materials. Processes carried out in liquid CO<sub>2</sub> (LCO<sub>2</sub>) are highly effective at removing PAHs, SVOCs, heavy metals and biofilm while maintaining the protective properties and durability of materials, making them one of the most promising technologies in the context of maintaining personal protective equipment (PPE) for firefighters. The collected results may support the development of national operating procedures and a certification system for decontamination processes serving the needs of the State Fire Service, the National Fire Service and rescue units operating in industrial plants.

**Keywords:** decontamination, LCO<sub>2</sub>, firefighters' protective clothing, WWA, SVOC, heavy metals, biofilm, ISO 23616, NFPA 1851

**Type of article:** review article

---

**Received:** 09.10.2025; **Reviewed:** 20.11.2025; **Accepted:** 25.11.2025;

Author's ORCID ID: 0009-0002-8735-2748;

**Please cite as:** SFT Vol. 66 Issue 2, 2025, pp. 98–112, <https://doi.org/10.12845/sft.66.2.2025.6>;

This is an open access article under the CC BY-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

---

#### ABSTRAKT

**Cel:** Celem pracy jest syntetyczna ocena skuteczności dostępnych technologii czyszczenia i dekontaminacji odzieży ochronnej strażaków, ze szczególnym uwzględnieniem procesów prowadzonych w ciekłym ditlenku węgla (LCO<sub>2</sub>) oraz ich wpływu na bezpieczeństwo użytkowników i trwałość materiałów.

**Metodologia:** Przeprowadzono systematyczny przegląd literatury z lat 2018–2024, obejmujący publikacje naukowe, raporty techniczne i dokumenty normatywne dotyczące czyszczenia i dekontaminacji odzieży ochronnej strażaków. Wyszukiwanie przeprowadzono w bazach Scopus, ScienceDirect i PubMed oraz w repozytoriach raportów technicznych (UL Solutions, Centexbel, Ghent University), stosując kombinacje słów kluczowych dotyczących zanieczyszczeń chemicznych (WWA, SVOC, metale ciężkie), mikrobiologicznych (biofilm) oraz procesów czyszczenia (pranie wodne, czyszczenie węglowodorowe, LCO<sub>2</sub>). Do analizy włączono jedynie prace zawierające dane ilościowe lub szczegółowe opisy parametrów procesu czyszczenia oraz badania oceniające wpływ czyszczenia na właściwości materiałów, takie jak trwałość hydrofobowość (DWR), integralność włókien i parametry mechaniczne.

Przegląd obejmuje wyniki badań prowadzonych przez wiodące ośrodki badawcze (Centexbel, UL Solutions, Ghent University, North Carolina State University) oraz analizę wymagań norm ISO 23616, NFPA 1851 i PN-EN 469 w zakresie skuteczności czyszczenia, walidacji procesów oraz utrzymania właściwości użytkowych odzieży ochronnej strażaków.

**Wnioski:** Przegląd pozwala na porównanie efektywności technologii czyszczenia i dekontaminacji odzieży ochronnej strażaków oraz identyfikację ich ograniczeń w kontekście bezpieczeństwa użytkowników i trwałości materiałów. Zebrane dane jednoznacznie wskazują, że technologie wodne często nie zapewniają pełnej dekontaminacji chemicznej i biologicznej, a ponadto mogą przyspieszać degradację materiałów. Procesy prowadzone w ciekłym CO<sub>2</sub> (LCO<sub>2</sub>) cechują się wysoką skutecznością usuwania WWA, SVOC, metali ciężkich i biofilmu przy zachowaniu właściwości ochronnych i trwałości materiałów, co czyni je jedną z najbardziej obiecujących technologii w kontekście utrzymania środków ochrony indywidualnej (ŚOI) strażaków. Zgromadzone wyniki mogą wspierać opracowanie krajowych procedur operacyjnych oraz systemu certyfikacji procesów dekontaminacji na potrzeby PSP, OSP oraz jednostek ratowniczych funkcjonujących w zakładach przemysłowych.

**Słowa kluczowe:** dekontaminacja, LCO<sub>2</sub>, odzież ochronna strażaków, WWA, SVOC, metale ciężkie, biofilm, ISO 23616, NFPA 1851

**Typ artykułu:** artykuł przeglądowy

**Przyjęty:** 09.10.2025; **Zrecenzowany:** 20.11.2025; **Zaakceptowany:** 25.11.2025;

Identyfikator ORCID autora: 0009-0006-7958-5065;

**Proszę cytować:** SFT Vol. 66 Issue 2, 2025, pp. 98–112, <https://doi.org/10.12845/sft.66.2.2025.6>;

Artykuł udostępniany na licencji CC BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

## Introduction

The firefighting profession involves chronic exposure to complex mixtures of combustion and pyrolysis products containing highly toxic compounds. In 2022, the International Agency for Research on Cancer (IARC) classified occupational exposure of firefighters as carcinogenic to humans (Group 1), indicating an increased risk of lung, skin and prostate cancer, as well as non-Hodgkin's Lymphoma [1]. The NFPA Research Foundation report (2022) emphasises that contamination of protective clothing is a significant vector of exposure to carcinogens both in the fire station and outside the service environment [2].

In recent years, there has been growing awareness that not only combustion products which are present during rescue and firefighting operations are a significant source of exposure to toxic substances, but also protective clothing (personal protective equipment, PPE), which remains contaminated with chemicals and microorganisms after such operations. Chemical analyses have shown that after several interventions, concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the order of 0.1–10 mg/kg and heavy metals such as lead, cadmium, chromium, and arsenic (metalloid) may be present in the fabrics of firefighters' clothing [3–5]. The highest levels are observed in areas of intensive use, e.g. on the knees, cuffs and collars, as well as in the membrane layers [3–4]. Similar profiles and levels of contamination with PAHs, SVOCs (semi-volatile organic compounds) and heavy metals in firefighting clothing after indoor fires were also found by Schuppe, who analysed both the outer and inner layers of protective clothing [9]. These contaminants penetrate the structure of multi-layered textiles – from the surface of the fabric, through the weave and threads, to the micropores of individual fibres. They can bind to them through hydrophobic reactions, including  $\pi$  –  $\pi$  interactions characteristic of aromatic compounds, which further hinders their removal in conventional washing processes [5–6]. The insufficient effectiveness of traditional water washing in case of hydrophobic compounds results from the limited affinity of the aqueous phase to non-polar compounds [6], [8].

## Wprowadzenie

Zawód strażaka wiąże się z przewlekłą ekspozycją na złożone mieszaniny produktów spalania i pirolizy, zawierających związki o wysokiej toksyczności. W 2022 r. Międzynarodowa Agencja Badań nad Rakiem (IARC) zaklasyfikowała narażenie zawodowe strażaków jako kancerogenne dla ludzi (grupa 1), wskazując zwiększone ryzyko występowania nowotworów płuca, skóry, prostaty oraz chłoniaków nieziarniczych [1]. Raport NFPA Research Foundation (2022) podkreśla, że skażenie odzieży ochronnej stanowi istotny wektor narażenia na substancje rakotwórcze zarówno w remizie, jak i poza środowiskiem służby [2].

W ostatnich latach rośnie świadomość, że istotnym źródłem ekspozycji na substancje toksyczne są nie tylko produkty spalania obecne podczas działań ratowniczo-gaśniczych, lecz także odzież ochronna (środki ochrony indywidualnej, ŚOI), która po takich działaniach pozostaje zanieczyszczona związkami chemicznymi i mikroorganizmami. Analizy chemiczne wykazały, że w tkaninach odzieży strażackiej po kilku interwencjach mogą występować stężenia wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA) rzędu 0,1–10 mg/kg oraz metale ciężkie, takie jak ołów, kadm, chrom oraz arsen (metalloid) [3–5]. Najwyższe poziomy obserwuje się w obszarach intensywnej eksploatacji, np. na kolanach, mankietach i kołnierzach, a także w warstwach membranowych [3–4]. Podobne profile i poziomy skażenia WWA, SVOC (związkami półlotnymi organicznymi), metalami ciężkimi w odzieży strażackiej po pożarach wewnętrznych wykazał również Schuppe, analizując zarówno warstwy zewnętrzne, jak i wewnętrzne ubrań ochronnych [9].

Zanieczyszczenia te wnikają w strukturę wielowarstwowych tekstyliów – od powierzchni tkaniny, przez sploty i nici, aż po mikropory pojedynczych włókien – i mogą wiązać się z nimi poprzez oddziaływania hydrofobowe, w tym interakcje  $\pi$ – $\pi$  charakterystyczne dla związków aromatycznych, co dodatkowo utrudnia ich usunięcie w konwencjonalnych procesach prania [5–6]. Niedostateczna skuteczność tradycyjnego prania wodnego w przypadku związków hydrofobowych wynika z ograniczonego

As shown, among others, by Schuppe's results [9], even repeated water washing does not remove a significant portion of highly hydrophobic PAHs, which remain in the fabric at levels that are significant from an exposure point of view.

These compounds primarily include high-molecular-weight, strongly hydrophobic congeners such as benzo[a]pyrene, benzo[b]fluoranthene, benzo[k]fluoranthene and dibenzo[a,h]anthracene, which, as demonstrated in studies by Schuppe [9], can remain in the fabric after repeated washing with water at levels that are significant in terms of dermal exposure.

A separate, significant problem is the development of microbial biofilm. Biofilm is a complex structure of microorganisms (bacteria and fungi) that produce a polysaccharide matrix which protects the colony from external factors and can be a persistent source of infections or allergic reactions. Under conditions of increased humidity and temperature inside protective clothing, biofilm can persist for up to several weeks [10].

Standard water washing, even when using industrial detergents, has limited effectiveness in removing hydrophobic contaminants such as PAHs and SVOCs. In addition, repeated washing leads to degradation of hydrophobic coatings and damage to polytetrafluoroethylene (PTFE) as well as its expanded versions (ePTFE) membranes and aramid fibres [6], [8].

Research conducted at North Carolina State University has shown that after just 25–30 water washing cycles, the fabric's wetting angle decreases by more than 50%, and the strength of the seams decreases by approximately 20–25% [6]. Such processes not only reduce the effectiveness of the protective barrier, but may also contribute to the fixation of contaminants in the fibre structure.

In response to these challenges, alternative technologies for decontaminating firefighters' PPE are being developed, including hydrocarbon cleaning, ozonation, ultrasonic methods and processes using liquid carbon dioxide (LCO<sub>2</sub>) [3–4], [10]<sup>1</sup>. The characteristics of LCO<sub>2</sub>, extraction mechanisms and the results of the effectiveness of this technology in comparison with water-based methods will be presented later in this paper, in the section devoted to data analysis and discussion.

The literature emphasises the need to evaluate decontamination methods, taking into account not only the effectiveness of contaminant removal, but also the impact on material durability, durable water repellency (DWR), fibre integrity and compliance with the requirements of ISO 23616, NFPA 1851 and PN-EN 469 [5], [7], [11]. This work is part of this trend, presenting an overview of available technologies and analysing their usefulness in the context of national practice.

powinowactwa fazy wodnej do związków niepolarnych [6], [8]. Jak pokazują m.in. wyniki Schuppe [9], nawet wielokrotne pranie wodne nie usuwa istotnej części wysoko hydrofobowych WWA, które pozostają w tkaninie na poziomach istotnych z punktu widzenia narażenia. Do związków tych należą przede wszystkim wysokocząsteczkowe, silnie hydrofobowe kongenery, takie jak benzo[a]piren, benzo[b]fluoranten, benzo[k]fluoranten czy dibenzo[a,h]antracen, które – jak wykazano w badaniach Schuppe [9] – mogą utrzymywać się w tkaninie po wielokrotnym praniu wodnym na poziomach istotnych z punktu widzenia narażenia dermalnego.

Odrębnym, istotnym problemem jest rozwój biofilmu mikrobiologicznego. Biofilm stanowi złożoną strukturę mikroorganizmów (bakterii i grzybów) wytwarzających macierz polisacharydową, która chroni kolonię przed czynnikami zewnętrznymi i może stanowić trwałe źródło zakażeń lub reakcji alergicznych. W warunkach podwyższonej wilgotności i temperatury wewnątrz odzieży ochronnej biofilm może utrzymywać się nawet przez kilka tygodni [10].

Standardowe pranie wodne, nawet przy użyciu detergentów przemysłowych, cechuje się ograniczoną skutecznością w usuwaniu zanieczyszczeń hydrofobowych, takich jak WWA czy SVOC. Dodatkowo wielokrotne pranie prowadzi do degradacji powłok hydrofobowych oraz uszkodzeń membran z politetrafluoroetylen (PTFE) i jego wersji ekspandowanych (ePTFE) oraz włókien aramidowych [6], [8].

Badania przeprowadzone na North Carolina State University wykazały, że już po 25–30 cyklach prania wodnego kąt zwilżania tkaniny spada o ponad 50%, a wytrzymałość szwów obniża się o około 20–25% [6]. Takie procesy nie tylko zmniejszają skuteczność bariery ochronnej, lecz także mogą sprzyjać utrwaleniu kontaminantów w strukturze włókien.

W odpowiedzi na te wyzwania rozwijane są alternatywne technologie dekontaminacji ŚOI strażaków obejmujące czyszczenie węglowodorowe, ozonowanie, metody ultradźwiękowe oraz procesy prowadzone w ciekłym ditlenku węgla (LCO<sub>2</sub>) [3–4], [10]<sup>1</sup>. Charakterystyka LCO<sub>2</sub>, mechanizmy ekstrakcji oraz wyniki skuteczności tej technologii w porównaniu z metodami wodnymi zostaną przedstawione w dalszej części pracy, w sekcji poświęconej analizie danych i dyskusji.

W literaturze podkreśla się potrzebę oceny metod dekontaminacji z uwzględnieniem nie tylko skuteczności usuwania zanieczyszczeń, ale także wpływu na trwałość materiałów, trwałość hydrofobowość (DWR), integralność włókien oraz zgodność z wymaganiami norm ISO 23616, NFPA 1851 i PN-EN 469 [5], [7], [11]. Niniejsza praca wpisuje się w ten nurt, prezentując przegląd dostępnych technologii i analizując ich przydatność w kontekście praktyki krajowej.

<sup>1</sup> LCO<sub>2</sub> – a decontamination process for firefighters' personal protective equipment (PPE) that uses liquid CO<sub>2</sub> and can be carried out only in devices specifically designed and verified for effectiveness in this application. LCO<sub>2</sub> devices that do not meet these requirements cannot ensure effective or safe decontamination. The data cited in this article come from studies conducted using dedicated LCO<sub>2</sub> systems whose effectiveness has been confirmed, in terms of performance and compliance with relevant requirements by notified bodies in Europe and the USA.

<sup>1</sup> LCO<sub>2</sub> – proces dekontaminacji strażackich ŚOI wykorzystujący ciekły CO<sub>2</sub>, możliwy do przeprowadzenia wyłącznie w urządzeniach specjalnie zaprojektowanych i potwierdzonych pod względem skuteczności w tym zastosowaniu. Urządzenia LCO<sub>2</sub> niespełniające tych wymogów nie zapewniają skutecznej ani bezpiecznej dekontaminacji. Dane cytowane w niniejszym artykule pochodzą z badań przeprowadzonych w dedykowanych systemach LCO<sub>2</sub>, których skuteczność została potwierdzona pod względem efektywności i zgodności z wymaganiami przez jednostki notyfikowane w Europie i USA.

## Materials and methods

This study is a systematic review of literature and was prepared in accordance with the general principles of reporting review studies (PRISMA). The aim was to compare technologies for cleaning and decontaminating firefighters' protective clothing, with particular emphasis on processes carried out in LCO<sub>2</sub>.

### Literature search

The search was conducted in the following databases:

- Scopus,
- ScienceDirect,
- PubMed,
- Google Scholar (grey literature),

and in repositories of technical reports:

- UL Solutions (USA),
- Centexbel (Belgium),
- Ghent University (UGent, Belgium),
- Institut für Brand- und Katastrophenschutz Heyrothsberge (Germany).

The analysis covered the years 2018–2024, taking into account the latest versions of ISO 23616, NFPA 1851 and PN-EN 469 standards

The keywords used (in various combinations, using AND/OR operators) included, among others:

- firefighter protective clothing, firefighter PPE,
- decontamination, cleaning,
- LCO<sub>2</sub>, liquid carbon dioxide,
- PAHs, polycyclic aromatic hydrocarbons,
- SVOCs, semi-volatile organic compounds,
- heavy metals,
- biofilm, microbial contamination,
- DWR durability, durable water repellency,
- PPE maintenance.

Sample queries:

- “firefighter protective clothing” AND “LCO<sub>2</sub>” AND “decontamination”,
- “PPE cleaning” AND “biofilm”,
- “PAH removal” AND “liquid CO<sub>2</sub>”.

The search results were verified for their substantive usefulness. Duplicates and publications that did not meet the inclusion criteria (no quantitative data, no description of process conditions or no connection with firefighting clothing) were excluded. Only studies containing quantitative data or a detailed description of the cleaning procedures and their impact on material properties were included in the analysis. The selection of sources was carried out in accordance with the general PRISMA guidelines, with particular emphasis on the transparency of inclusion and exclusion criteria.

### The scope of the review and criteria for selecting sources

#### Inclusion criteria:

1. Publications containing quantitative data on at least one of the following groups of pollutants:
  - WWA,

## Materiały i metody

Niniejsze opracowanie ma charakter systematycznego przeglądu literatury i zostało przygotowane zgodnie z ogólnymi zasadami raportowania badań przeglądowych (PRISMA). Celem było porównanie technologii czyszczenia i dekontaminacji odzieży ochronnej strażaków, ze szczególnym uwzględnieniem procesów prowadzonych w LCO<sub>2</sub>.

### Wyszukiwanie literatury

Wyszukiwanie przeprowadzono w następujących bazach danych:

- Scopus,
- ScienceDirect,
- PubMed,
- Google Scholar (literatura szara),

oraz w repozytoriach raportów technicznych:

- UL Solutions (USA),
- Centexbel (Belgia),
- Ghent University (UGent, Belgia),
- Institut für Brand- und Katastrophenschutz Heyrothsberge (Niemcy).

Analiza objęła lata 2018–2024, z uwzględnieniem najnowszych wersji norm ISO 23616, NFPA 1851 oraz PN-EN 469.

Zastosowano następujące słowa kluczowe (w różnych kombinacjach, z użyciem operatorów AND/OR):

- *firefighter protective clothing, firefighter PPE,*
- *decontamination, cleaning,*
- *LCO<sub>2</sub>, liquid carbon dioxide,*
- *PAHs, polycyclic aromatic hydrocarbons,*
- *SVOCs, semi-volatile organic compounds,*
- *heavy metals,*
- *biofilm, microbial contamination,*
- *DWR durability, durable water repellency,*
- *PPE maintenance.*

Przykładowe zapytania:

- “firefighter protective clothing” AND “LCO<sub>2</sub>” AND “decontamination”,
- “PPE cleaning” AND “biofilm”,
- “PAH removal” AND “liquid CO<sub>2</sub>”.

Wyniki wyszukiwania zostały poddane weryfikacji pod kątem przydatności merytorycznej. Wykluczono duplikaty oraz publikacje niespełniające kryteriów włączenia (brak danych ilościowych, opisu warunków procesu lub związku z odzieżą strażacką). Do analizy włączono jedynie prace zawierające dane ilościowe lub szczegółowy opis procedur czyszczenia i ich wpływu na właściwości materiałów. Selekcja źródeł została przeprowadzona zgodnie z ogólnymi zasadami PRISMA, ze szczególnym uwzględnieniem przejrzystości kryteriów włączenia i wykluczenia.

### Zakres przeglądu i kryteria doboru źródeł

#### Kryteria włączenia:

1. Publikacje zawierające ilościowe dane dotyczące przynajmniej jednej z grup zanieczyszczeń:
  - WWA,

- SVOC,
  - heavy metals,
  - biofilm or general microbial load.
2. Studies describing the conditions of the cleaning process (medium, temperature, pressure, number of cycles, use of detergents/adjuvants).
  3. Studies assessing the impact of the cleaning process on material properties (DWR, fibre integrity, mechanical parameters).
  4. Reports and publications from recognised research centres and certification bodies (Centexbel, UL Solutions, North Carolina State University, Ghent University).

Both studies reporting concentrations of individual metals (e.g. Pb, Cd, Cr, As) and studies providing aggregate indicators for 'heavy metals' were included.

#### Exclusion criteria:

- publications that do not contain numerical data (comments, review articles),
- works without a description of the measurement methodology used,
- reports not related to protective clothing for firefighters or other PPE items.

#### Method of data analysis

The collected numerical data was subjected to a comparative analysis covering:

- standardisation of units (mg/kg, %, log reduction),
- categorisation of results by type of pollutant (PHCs, SVOCs, heavy metals, biofilm),
- comparison of the effectiveness of cleaning methods (water washing, hydrocarbon cleaning, ozonation, ultrasonic methods, LCO<sub>2</sub>) based on range values,
- comparison of the impact of the processes on the material properties (DWR, fibre integrity, mechanical strength).

The data were compiled in comparative tables and, in the discussion, cross-referenced with the requirements of ISO 23616, NFPA 1851 and PN-EN 469. The data were not statistically averaged between different tests. Descriptive generalisations (e.g. '35-50% reduction') were used to avoid direct comparison of results obtained by different analytical methods.

#### Normative and validation

The analysis took into account the following:

- ISO 23616:2024 – *Cleaning, inspection and repair of firefighters' personal protective equipment (PPE)* [7],
- NFPA 1851:2020 – *Standard on Selection, Care, and Maintenance of Protective Ensembles for Structural Fire Fighting and Proximity Fire Fighting* [11],
- PN-EN 469:2021 – *Protective clothing for firefighters. Performance requirements for protective clothing for fire-fighting* [8],
- restrictions resulting from REACH regulations (EC 1907/2006, Annex XVII) [12] and the criteria of the OEKO-TEX® Standard 100 [13].

- SVOC,
- metale ciężkie,
- biofilm lub ogólne obciążenie mikrobiologiczne.

2. Prace opisujące warunki procesu czyszczenia (medium, temperatura, ciśnienie, liczba cykli, zastosowanie detergentów/adjuwantów).
3. Badania oceniające wpływ procesu czyszczenia na właściwości materiałów (DWR, integralność włókien, parametry mechaniczne).
4. Raporty i publikacje pochodzące z uznanych ośrodków badawczych i jednostek certyfikujących (Centexbel, UL Solutions, North Carolina State University, Ghent University).

Uwzględniono zarówno prace raportujące stężenia pojedynczych metali (np. Pb, Cd, Cr, As), jak i opracowania podające zbiorcze wskaźniki „metale ciężkie”.

#### Kryteria wykluczenia:

- publikacje niezawierające danych liczbowych (komentarze, artykuły poglądowe),
- prace bez opisu zastosowanej metodologii pomiarowej,
- doniesienia nietyczące odzieży ochronnej strażaków lub innych elementów ŚOI.

#### Sposób analizy danych

Zgromadzone dane liczbowe poddano analizie porównawczej obejmującej:

- ujednoczenie jednostek (mg/kg, %, log-redukcja),
- kategoryzację wyników według rodzaju zanieczyszczeń (WWA, SVOC, metale ciężkie, biofilm),
- porównanie efektywności metod czyszczenia (pranie wodne, czyszczenie węglowodorowe, ozonowanie, metody ultradźwiękowe, LCO<sub>2</sub>) na podstawie wartości zakresowych,
- porównanie wpływu procesów na właściwości materiałów (DWR, integralność włókien, wytrzymałość mechaniczna).

Dane zestawiono w tabelach porównawczych, a w dyskusji odniesiono je do wymagań norm ISO 23616, NFPA 1851 oraz PN-EN 469. Dane nie były uśredniane statystycznie pomiędzy różnymi badaniami. Zastosowano opisowe uogólnienia zakresowe (np. „35–50% redukcji”), co pozwalało uniknąć bezpośredniego zestawienia wyników uzyskanych różnymi metodami analitycznymi.

#### Aspekty normatywne i walidacyjne

W analizie uwzględniono:

- ISO 23616:2024 – *Cleaning, inspection and repair of firefighters' personal protective equipment (PPE)* [7],
- NFPA 1851:2020 – *Standard on Selection, Care, and Maintenance of Protective Ensembles for Structural Fire Fighting and Proximity Fire Fighting* [8],
- PN-EN 469:2021 – *Odzież ochronna dla strażaków – Wymagania użytkowe dotyczące odzieży ochronnej przeznaczonej do akcji przeciwpożarowych* [11],
- ograniczenia wynikające z przepisów REACH (EC 1907/2006, Załącznik XVII) [12] oraz kryteria standardu OEKO-TEX® Standard 100 [13].

These standards define, among other things, requirements for the effectiveness of cleaning, process validation, the preservation of the functional properties of clothing after cleaning, and acceptable levels of chemical residues.

Their objective is to ensure that cleaning, inspection and repair processes are repeatable, validatable and safe, thus minimising the risk of chemical and microbiological contamination and degradation of the protective properties of clothing used in rescue and firefighting operations.

Normy te definiują m.in. wymagania dotyczące skuteczności czyszczenia, walidacji procesów, zachowania właściwości użytkowych odzieży po czyszczeniu oraz dopuszczalnych poziomów pozostałości substancji chemicznych.

Ich celem jest zagwarantowanie, aby procesy czyszczenia, kontroli i napraw były powtarzalne, walidowalne i bezpieczne, a tym samym minimalizowały ryzyko skażenia chemicznego i mikrobiologicznego oraz degradacji właściwości ochronnych odzieży wykorzystywanej w działaniach ratowniczo-gaśniczych.

## Comparative analysis of cleaning technologies for firefighters' protective clothing

Based on a literature review, a comparative table of the main cleaning technologies for firefighters' protective clothing was developed (see Table 1).

## Porównawcza analiza technologii czyszczenia odzieży ochronnej strażaków

Na podstawie analizy literaturowej opracowano tabelę porównawczą głównych technologii czyszczenia odzieży ochronnej strażaków (zob. tabela 1).

**Table 1.** Characteristics of selected technologies for cleaning firefighters' protective clothing  
**Tabela 1.** Charakterystyka wybranych technologii czyszczenia odzieży ochronnej strażaków

Technology / Technologia	Process temperature / Temperatura procesu	Medium / Medium	Need for detergents/adjuvants / Konieczność użycia detergentów / adiuwantów	Effectiveness against PAHs/SVOCs (range) / Skuteczność wobec WWA/SVOC (zakres)	Effectiveness against biofilm/microorganisms / Skuteczność wobec biofilmu / mikroorganizmów	Impact on DWR / Wpływ na DWR	Impact on fibres/seams / Wpływ na włókna / szwy	General remarks / Uwagi ogólne
Water washing / Pranie wodne	30–60°C	Water / Woda	Industrial detergents / Detergenty przemysłowe	Approx. 30–50% [3–4] / Ok. 30–50% [3–4]	1–3 log (90–99.9%) [10]	Decrease <50% after 20 cycles [6] / Spadek <50% po 20 cyklach [6]	Micro-cracks, fibre erosion [6] / Mikropęknięcia, erozja włókien [6]	Mainly surface process, no extraction of hydrophobic fractions / Proces głównie powierzchniowy, brak ekstrakcji frakcji hydrofobowych
Hydrocarbon cleaning (HCS) / Czyszczenie węglowodorowe (HCS)	20–40°C	HCS solvents / rozpuszczalniki HCS	Yes / Tak	Approx. 50–70% [4–5] / Ok. 50–70% [4–5]	Limited / Ograniczona	Moderate degradation / Umiarkowana degradacja	Risk of solvent residues / Ryzyko pozostałości rozpuszczalników	Environmental and regulatory constraints / Ograniczenia środowiskowe i regulacyjne
Ozonation / Ozonowanie	Ambient temperature / Temp. otoczenia	Ozone (gas) / Ozon (gaz)	None / Brak	Low against WWA/SVOC [5] / Niska wobec WWA/SVOC [5]	High against microorganisms [5], [10] / Wysoka wobec mikroorganizmów [5], [10]	No significant impact / Brak istotnego wpływu	Possible degradation of membranes during prolonged exposure / Możliwa degradacja membran przy długiej ekspozycji	Complementary method, does not ensure complete chemical decontamination / Metoda uzupełniająca, nie zapewnia pełnej dekontaminacji chemicznej

*Ciąg dalszy tabeli na następnej stronie*

Technology / Technologia	Process temperature / Temperatura procesu	Medium / Medium	Need for detergents/adjuvants / Konieczność użycia detergentów / adiuwantów	Effectiveness against PAHs/SVOCs (range) / Skuteczność wobec WWA/SVOC (zakres)	Effectiveness against biofilm/microorganisms / Skuteczność wobec biofilmu / mikroorganizmów	Impact on DWR / Wpływ na DWR	Impact on fibres/seams / Wpływ na włókna / szwy	General remarks / Uwagi ogólne
Ultrasound + detergents / Ultradźwięki + detergenty	20–40°C	Water bath / Kąpiel wodna	Yes / Tak	Average, dependent on parameters [5] / Średnia, zależna od parametrów [5]	Average / Średnia	Possible degradation with prolonged exposure / Możliwa degradacja przy długotrwałym działaniu	Risk of mechanical / Ryzyko uszkodzeń mechanicznych	No broad validation with regard to ISO/NFPA standards / Brak szerokiej walidacji w odniesieniu do norm ISO/NFPA
LCO <sub>2</sub>	20–30°C	Liquid carbon dioxide / Ciekły CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> -compatible adjuvants [3] / adiuwanty kompatybilne z CO <sub>2</sub> [5]	≥90% [3–5]	≥5 log (≥99.999%) [10]	DWR >90% after 50 cycles [6] / DWR >90% po 50 cyklach [6]	No observed degradation after 50 cycles [3], [6] / Brak obserwowanej degradacji po 50 cyklach [3], [6]	Validatable, repeatable process, compliant with ISO 23616 and NFPA 1851 standards / Proces walidowalny, powtarzalny, zgodny z normami ISO 23616 i NFPA 1851

Source: Own elaboration based on [3–6], [10].

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [3–6], [10].

## Data analysis and discussion

This analysis focuses on comparing the results of studies available in the literature on the effectiveness of water washing and LCO<sub>2</sub> cleaning. In the following subsections, the key parameters of these processes are discussed, including the effectiveness of removing chemical and biological contaminants and the impact on material properties.

### Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and SVOCs

In water washing processes, the average reduction in total PAHs is typically in the range of 30–50% [3–4]. In case of high-molecular-weight congeners (e.g. benzo[a]pyrene, dibenzo[a,h]anthracene), this efficiency may be even lower due to their low solubility in water [3], [5].

In LCO<sub>2</sub> processes, reductions in PAHs and SVOCs of ≥ 90% have been reported, and for total indicators (Σ16 PAHs, ΣSVOCs) values of 92–95% [3–5]. The final levels obtained are often close to the limit of detection of analytical methods (see Table 2).

## Analiza danych i dyskusja

W niniejszej analizie skoncentrowano się na porównaniu wyników badań dostępnych w literaturze, dotyczących skuteczności prania wodnego oraz czyszczenia w technologii LCO<sub>2</sub>. W kolejnych podrozdziałach omówiono kluczowe parametry tych procesów, w tym efektywność usuwania zanieczyszczeń chemicznych i biologicznych oraz wpływ na właściwości materiałów.

### Wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA) i SVOC

W procesach prania wodnego średni poziom redukcji sumy WWA mieści się zazwyczaj w przedziale 30–50% [3–4]. W przypadkach wysokocząsteczkowych kongenerów (np. benzo[a]piren, dibenzo[a,h]antracen) skuteczność ta może być jeszcze niższa, co wynika z ich niskiej rozpuszczalności w wodzie [3], [5].

W procesach LCO<sub>2</sub> odnotowano redukcje WWA i SVOC na poziomie ≥ 90%, a w przypadku sumarycznych wskaźników (Σ16 WWA, ΣSVOC) wartości rzędu 92–95% [3–5]. Uzyskiwane poziomy końcowe są często zbliżone do granicy oznaczalności metod analitycznych (zob. tabela 2).

**Table 2.** Example values for PAH and SVOC reduction in two methods of cleaning firefighting clothing: water washing and the LCO<sub>2</sub> process  
**Tabela 2.** Przykładowe wartości redukcji WWA i SVOC w dwóch metodach czyszczenia odzieży strażackiej: praniu wodnym i procesie LCO<sub>2</sub>

Compound / parameter / Związek / parametr	Initial concentration [mg/kg]* / Stężenie wyjściowe [mg/kg]*	After water washing [mg/kg]* / Po praniu wodnym [mg/kg]*	Reduction – water [%] / Redukcja – woda [%]	After LCO <sub>2</sub> [mg/kg]* / Po LCO <sub>2</sub> [mg/kg]*	Reduction – LCO <sub>2</sub> [%] / Redukcja – LCO <sub>2</sub> [%]
Benzo[a]pyrene (BaP) / Benzo[a]piren (BaP)	1.20	0.70	42	0.08	93
Naphthalene / Naftalen	2.50	1.60	36	0.20	92
Fluoranthene / Fluoranten	0.95	0.47	51	0.06	94
Σ16 PAHs / Σ16 WWA	8.40	4.60	45	0.65	92
Σ SVOCs (phthalates) / Σ SVOC (ftalany)	3.80	1.90	50	0.30	92

\* Data averaged from ranges reported by Centexbel [3], UL Solutions [4], and Girase et al. [5] / Dane uśrednione z zakresów raportowanych przez Centexbel [3], UL Solutions [4] i Girase i in. [5]

Source: Own elaboration based on [3–5], [6].

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [3–5], [6].

The higher effectiveness of LCO<sub>2</sub> can be explained by:

- better solubility of hydrophobic fractions in a non-polar medium,
- low surface tension and viscosity of CO<sub>2</sub>, which facilitate penetration into the fiber structure,
- the possibility of working in a closed system without fiber swelling, which promotes extraction rather than mechanical surface removal [5–6].

Wyższą skuteczność LCO<sub>2</sub> tłumaczy się:

- lepszą rozpuszczalnością frakcji hydrofobowych w niepolarnym medium,
- niskim napięciem powierzchniowym i lepkością CO<sub>2</sub>, które ułatwiają penetrację w głąb struktury włókien,
- możliwością pracy w układzie zamkniętym, bez pęcznienia włókien, co sprzyja ekstrakcji zamiast mechanicznego usuwania powierzchniowego [5–6].

### Heavy metals

Research conducted by Centexbel [3] and UL Solutions [4] has shown that after several cycles of water washing, significant amounts of heavy metals remain in firefighter clothing fabrics.

Typical ranges are:

- Pb: 0.5–2.0 mg/kg,
- Cd: 0.1–0.8 mg/kg,
- Cr: 1.0–4.0 mg/kg,
- As: 0.5–1.5 mg/kg [3–4].

After applying LCO<sub>2</sub> processes, the concentrations of these metals fell below the limit of quantification (LOQ) of 0.05–0.1 mg/kg [3–4]. The results of available studies are presented in Table 3.

### Metale ciężkie

Badania Centexbel [3] i UL Solutions [4] wykazały, że po kilku cyklach prania wodnego w tkaninach odzieży strażackiej utrzymują się istotne ilości metali ciężkich.

Typowe zakresy to:

- Pb: 0,5–2,0 mg/kg,
- Cd: 0,1–0,8 mg/kg,
- Cr: 1,0–4,0 mg/kg,
- As: 0,5–1,5 mg/kg [3–4].

Po zastosowaniu procesów LCO<sub>2</sub> stężenia tych metali spadały poniżej granicy oznaczalności (LOQ) 0,05–0,1 mg/kg [3–4]. Wyniki dostępnych badań przedstawiono w tabeli 3.

**Table 3.** Example reduction in heavy metal content in firefighters' protective clothing after water washing and after the LCO<sub>2</sub> cleaning process (ICP–MS)

**Tabela 3.** Przykładowa redukcja zawartości metali ciężkich w odzieży ochronnej strażaków po praniu wodnym i po procesie czyszczenia LCO<sub>2</sub> (ICP–MS)

Metal / Metal	Initial concentration [mg/kg]* / Stężenie wyjściowe [mg/kg]*	After water washing [mg/kg]* / Po praniu wodnym [mg/kg]*	Reduction – water [%] / Redukcja – woda [%]	After LCO <sub>2</sub> [mg/kg]* / Po LCO <sub>2</sub> [mg/kg]*	Reduction – LCO <sub>2</sub> [%] / Redukcja – LCO <sub>2</sub> [%]
Lead /Ołów (Pb)	25.0	14.0	44	< LOQ	>96
Cadmium /Kadm (Cd)	1.20	0.80	33	< LOQ	>92

ciąg dalszy tabeli na następnej stronie

Metal / Metal	Initial concentration [mg/kg]* / Stężenie wyjściowe [mg/kg]*	After water washing [mg/kg]* / Po praniu wodnym [mg/kg]*	Reduction – water [%] / Redukcja – woda [%]	After LCO <sub>2</sub> [mg/kg]* / Po LCO <sub>2</sub> [mg/kg]*	Reduction – LCO <sub>2</sub> [%] / Redukcja – LCO <sub>2</sub> [%]
Arsenic / Arsen (As)	2.10	1.20	43	< LOQ	>95
Chrome / Chrom (Cr)	6.50	3.90	40	0.40	94

\* Range data converted to representative values based on [3–4]. LOQ: 0,05–0,1 mg/kg. / Dane zakresowe przeliczone na wartości reprezentatywne na podstawie [3–4]. LOQ: 0,05–0,1 mg/kg.

Source: Own elaboration based on [3–4].

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [3–4].

Girase et al. [5] described that the use of CO<sub>2</sub>-compatible adjuvants containing metal ion complexing components can further increase the effectiveness of heavy metal removal, confirming the importance of selecting the appropriate composition of the LCO<sub>2</sub> bath.

#### Toxicological criteria

In light of REACH regulations (Annex XVII) and OEKO-TEX® Standard 100 criteria, the permissible levels of selected PAHs in new textile products are very low (e.g., Σ8 PAHs ≤1 mg/kg in REACH and Σ24 PAHs ≤1 mg/kg) [12–13].

The literature indicates that after water washing, these levels may remain above safety limits [3–4], whereas after the use of LCO<sub>2</sub>, the concentrations of PAHs and SVOCs fall below toxicological thresholds in most of the cases analysed [3–5]. This is a significant argument in favour of introducing LCO<sub>2</sub> technology into the standard for maintaining PPE.

#### Biological decontamination and biofilm reduction

Microbiological studies conducted at Ghent University (UGent) have shown that traditional water washing reduces microorganisms by 1–3 log, which corresponds to the elimination of 90–99.9% of microorganisms [10]. However, after a few days, recolonization of fabrics was observed, especially in areas with limited penetration of the washing solution [10].

In case of LCO<sub>2</sub> processes, a reduction of ≥5 log was achieved, i.e. a 100,000-fold decrease in the number of viable microorganisms (from 10<sup>5</sup> to 10<sup>0</sup>), which corresponds to an elimination rate of ≥99.999% [10].

It should be clearly noted here that a 5-log reduction means a decrease in the number of viable microorganisms by 5 orders of magnitude, which is equivalent to removing 99.999% of the initial population. A comparison of the effectiveness of the analysed methods in reducing biofilm is shown in Table 4.

Girase i in. [5] opisali, że zastosowanie adiuwantów kompatybilnych z CO<sub>2</sub>, zawierających komponenty kompleksujące jony metali może dodatkowo zwiększać skuteczność usuwania metali ciężkich, co potwierdza rolę odpowiedniego doboru składu kąpeli LCO<sub>2</sub>.

#### Kryteria toksykologiczne

W świetle przepisów REACH (Załącznik XVII) oraz kryteriów OEKO-TEX® Standard 100 dopuszczalne poziomy wybranych WWA w nowych wyrobach tekstylnych są bardzo niskie (np. Σ8 WWA ≤1 mg/kg w REACH i Σ24 WWA ≤1 mg/kg) [12–13].

W literaturze wskazuje się, że po praniu wodnym poziomy te mogą pozostawać powyżej granic bezpieczeństwa [3–4], natomiast po zastosowaniu LCO<sub>2</sub> stężenia WWA i SVOC w większości analizowanych przypadków spadają poniżej progów toksykologicznych [3–5]. Stanowi to istotny argument na rzecz wprowadzenia technologii LCO<sub>2</sub> do standardu utrzymania ŚOI.

#### Dekontaminacja biologiczna i redukcja biofilmu

Badania mikrobiologiczne prowadzone na Uniwersytecie w Gandawie (Ghent University, UGent) wykazały, że tradycyjne pranie wodne zapewnia redukcję mikroorganizmów na poziomie 1–3 log, co odpowiada eliminacji 90–99,9% drobnoustrojów [10]. Po kilku dniach obserwowano jednak ponowną kolonizację tkanin, zwłaszcza w miejscach o ograniczonej penetracji roztworu piorącego [10].

W przypadku procesów LCO<sub>2</sub> uzyskiwano redukcję ≥5 log, czyli zmniejszenie liczby żywych mikroorganizmów 100 000-krotnie (z 10<sup>5</sup> do 10<sup>0</sup>), co odpowiada ≥99,999% eliminacji [10].

Należy przy tym wyraźnie zaznaczyć, że redukcja 5-log oznacza zmniejszenie liczby zdolnych do życia mikroorganizmów o 5 rządów wielkości, co jest równoważne usunięciu 99,999% populacji wyjściowej. Porównanie skuteczności analizowanych metod w redukcji biofilmu ukazano w tabeli 4.

**Table 4.** Comparison of biofilm reduction and microbial load in water washing and LCO<sub>2</sub> cleaning processes**Tabela 4.** Porównanie redukcji biofilmu i obciążenia mikrobiologicznego w procesach prania wodnego i czyszczenia LCO<sub>2</sub>

Parameter / Parametr	Water washing / Pranie wodne	LCO <sub>2</sub>
Biofilm reduction [log] / Redukcja biofilmu [log]	1–3	≥5
Mesophilic bacteria reduction [%] / Redukcja bakterii mezofilnych [%]	70–95	≥99.999
Recolonization after 72 hours / Rekolonizacja po 72 h	Frequent / Często	Rare / Rzadka

Source: Own elaboration based on [10].

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [10].

The level of reduction ≥5-log is not a literal requirement of ISO 23616 or NFPA 1851, but it is a threshold of high effectiveness of PPE biodecontamination commonly accepted in the literature. It is consistent with the approach used in validation studies of firefighter clothing cleaning processes and with the definitions of effective sanitation used by the US Environmental Protection Agency (EPA) and PPE care programs based on NFPA 1851. Achieving a ≥5-log reduction is crucial for reducing the risk of infections and allergic reactions associated with biofilm [10].

Poziom redukcji ≥5-log nie jest literalnym wymaganiem norm ISO 23616 ani NFPA 1851, jednak stanowi powszechnie przyjmowany w literaturze próg wysokiej skuteczności biodekontaminacji ŚOI. Jest on zgodny z podejściem stosowanym w badaniach walidacyjnych procesów czyszczenia odzieży strażackiej oraz z definicjami skutecznej sanitacji stosowanymi przez Agencję Ochrony Środowiska Stanów Zjednoczonych (EPA) i programy pielęgnacji ŚOI oparte na NFPA 1851. Osiągnięcie redukcji ≥5-log ma kluczowe znaczenie dla ograniczenia ryzyka zakażeń oraz reakcji alergicznych związanych z biofilmem [10].

#### Impact of the process on the functional properties of materials

##### Durable water repellency (DWR)

Data from North Carolina State University [6] and reports by Centexbel [3] and UL Solutions [4] indicate that:

- after 20 water washing cycles, durable water repellency (DWR) typically falls below 50% of its initial value,
- after 50 cleaning cycles in LCO<sub>2</sub>, DWR remains at ≥90% of its initial value.

The above data is summarized in Table 5.

#### Wpływ procesu na właściwości użytkowe materiałów

##### Trwała hydrofobowość (DWR)

Dane z North Carolina State University [6] oraz raportów Centexbel [3] i UL Solutions [4] wskazują, że:

- po 20 cyklach prania wodnego trwała hydrofobowość (DWR) spada zazwyczaj poniżej 50% wartości początkowej,
- po 50 cyklach czyszczenia w LCO<sub>2</sub> DWR utrzymuje się na poziomie ≥90% wartości początkowej.

Zestawienie ww. danych zawarto w tabeli 5.

**Table 5.** Changes in durable water repellency (DWR) in successive cycles of water washing and LCO<sub>2</sub> cleaning**Tabela 5.** Zmiany trwałej hydrofobowości (DWR) w kolejnych cyklach prania wodnego i czyszczenia LCO<sub>2</sub>

The number of cycles / Liczba cykli	Water washing – DWR [% of initial value] / Pranie wodne – DWR [% wartości początkowej]	LCO <sub>2</sub> – DWR [% of initial value] / LCO <sub>2</sub> – DWR [% wartości początkowej]
0	100	100
10	70	98
20	48	96
30	41	94
50	34	92

Source: Own elaboration based on [3–4], [6].

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [3–4], [6].

#### Fiber integrity and mechanical properties

Microscopic analyses (SEM) conducted at Centexbel and NC State showed that:

- samples after multiple water washing cycles show microcracks, erosion, and fibre splitting,
- samples after 50 LCO<sub>2</sub> cleaning cycles show no visible degradation of the fibre surface [3], [6].

Endurance tests [6] have shown that:

- the decrease in tensile strength after 20 cycles of water

#### Integralność włókien i parametry mechaniczne

Analizy mikroskopowe (SEM) przeprowadzone w Centexbel i NC State wykazały, że:

- w próbkach po wielu cyklach prania wodnego obserwuje się mikropęknięcia, erozję i rozszczepienia włókien,
- w próbkach po 50 cyklach czyszczenia LCO<sub>2</sub> brak jest widocznej degradacji powierzchni włókien [3], [6].

Badania wytrzymałościowe [6] dowiodły z kolei, że:

- spadek wytrzymałości na rozciąganie po 20 cyklach

- washing fluctuates between 10% and 15% (depending on the direction of the warp and weft),
  - a decrease in the above characteristic below 2% is observed after 50 LCO<sub>2</sub> cleaning cycles.
- prania wodnego oscyluje na poziomie 10–15% (w zależności od kierunku osnowy i wątku),
  - spadek ww. charakterystyki poniżej 2% obserwowany jest po 50 cyklach czyszczenia LCO<sub>2</sub>.

**Table 6.** Changes in the mechanical parameters of the outer fabric after cycles of water washing and LCO<sub>2</sub> cleaning  
**Tabela 6.** Zmiany parametrów mechanicznych tkaniny zewnętrznej po cyklach prania wodnego i czyszczenia LCO<sub>2</sub>

Parameter (standard) / Parametr (norma)	Initial state / Stan wyjściowy	After 20 cycles – water / Po 20 cyklach – woda	Change [%] / Zmiana [%]	After 50 cycles – LCO <sub>2</sub> / Po 50 cyklach – LCO <sub>2</sub>	Change [%] / Zmiana [%]
Tensile strength – warp (ISO 13934-1) [N] / Wytrzymałość na rozciąganie – osnowa (ISO 13934-1) [N]	1500	1335	-11	1475	-2
Tensile strength – weft (ISO 13934-1) [N] / Wytrzymałość na rozciąganie – wątek (ISO 13934-1) [N]	1350	1210	-10	1330	-1.5
Tearing – the pants method (ISO 13937-2) [N] / Rozdzieranie – metoda spodni (ISO 13937-2) [N]	75	64	-15	74	-1

Source: Own elaboration based on [3–4], [6].

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [3–4], [6].

#### Environmental and energy aspects

LCO<sub>2</sub> technology is analysed in the literature not only in terms of decontamination effectiveness, but also in the context of life cycle assessment (LCA) and environmental impact [3–4], [6].

#### Aspekty środowiskowe i energetyczne

Technologia LCO<sub>2</sub> jest analizowana w literaturze nie tylko pod kątem skuteczności dekontaminacji, ale także w kontekście oceny cyklu życia (ang. *Life Cycle Assessment*, LCA) i wpływu na środowisko [3–4], [6].

**Table 7.** Comparison of selected environmental and energy aspects of water washing and LCO<sub>2</sub> cleaning

**Tabela 7.** Porównanie wybranych aspektów środowiskowych i energetycznych prania wodnego i czyszczenia LCO<sub>2</sub>

Criterion / Kryterium	Water washing / Pranie wodne	LCO <sub>2</sub>
Water consumption per load [l] / Zużycie wody na 1 komplet [l]	40–60	~0
Total energy consumption of the washing process [MJ/load] / Całkowita energia procesu prania [MJ/komplet]	7–10	5–8
Waste load / detergents / Ładunek ściekowy / detergenty	High / Wysoki	Scarce / Znikomy
Carbon footprint of the energy cycle / Ślad węglowy cyklu energetycznego	Average / Średni	Low / Niski

Source: Own elaboration based on [3–4], [6].

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [3–4], [6].

Compared to water washing in the LCO<sub>2</sub> process:

- water consumption is practically zero (the medium is recovered in a closed circuit),
- no wastewater containing detergents and contaminants is generated, and the only waste is small filtration residues, typical for closed-loop processes.
- energy consumption is similar or lower (by approx. 20–30%) depending on the installation settings [3–4], [6].

W porównaniu z praniem wodnym w procesie LCO<sub>2</sub>:

- zużycie wody jest praktycznie zerowe (medium jest odzyskiwane w obiegu zamkniętym),
- nie są generowane ścieki zawierające detergenty i kontaminanty, a jedynymi odpadami są niewielkie pozostałości filtracyjne, typowe dla procesów prowadzonych w układzie zamkniętym.
- zapotrzebowanie na energię jest podobne lub niższe (o ok. 20–30%) w zależności od ustawień instalacji [3–4], [6].

In light of the requirements of the circular economy and growing pressure to reduce water consumption and pollutant emissions, LCO<sub>2</sub> can be classified as a technology with a favourable environmental profile [3–4].

## Summary comparison of protective clothing cleaning methods

In order to simplify the comparison of the key parameters of both technologies, a summary of their effectiveness has been prepared (see Table 8).

**Table 8.** A comprehensive comparison of selected parameters of the effectiveness of water washing and LCO<sub>2</sub> cleaning of firefighters' protective clothing  
**Tabela 8.** Zbiorcze porównanie wybranych parametrów efektywności prania wodnego i czyszczenia LCO<sub>2</sub> odzieży ochronnej strażaków

Criterion / Kryterium	Water washing / Pranie wodne	LCO <sub>2</sub>
PAH reduction (GC–MS) [%] / Redukcja WWA (GC–MS) [%]	30–50	≥90
SVOC reduction (GC–MS) [%] / Redukcja SVOC (GC–MS) [%]	35–50	>90
Heavy metal reduction (ICP–MS) [%] / Redukcja metali ciężkich (ICP–MS) [%]	30–50	≥95 / below LOQ / ≥95 / poniżej LOQ
Biofilm reduction [log] / Redukcja biofilmu [log]	1–3	≥5
DWR after 50 cycles [% of initial value] / DWR po 50 cyklach [% wartości pocz.]	<50	>90
SEM observations – microcracks / Obserwacje SEM – mikropęknięcia	Present / Obecne	None / Brak

Source: Own elaboration based on [3–6], [10].

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [3–6], [10].

Data from publications by Centexbel [3], UL Solutions [4], Girase et al. [5], and NC State [6] confirm that cleaning with liquid carbon dioxide (LCO<sub>2</sub>) provides significantly higher chemical decontamination efficiency than traditional water washing.

## Significance of the results

Effective removal of chemical and biological contaminants from firefighters' protective clothing is crucial for reducing secondary exposure to toxic substances that are considered carcinogenic or harmful to health. The collected data clearly show that clothing worn during rescue and firefighting operations can act as a permanent “storage facility” for PAHs, SVOCs, heavy metals, and biofilm [3–5], [10]. Insufficient decontamination increases the risk of these compounds penetrating the skin and being transferred to the firefighter's personal environment (private vehicles, home, family).

The results of the review show clear differences in the effectiveness of cleaning technologies. Water-based methods, although widely used and well known, do not ensure complete chemical decontamination and accelerate material degradation [3–4], [6]. Alternative technologies (ozonation, ultrasound) can be considered complementary, but do not replace the need for deep extraction [6], [10].

LCO<sub>2</sub> technology stands out from the other methods by combining three key factors:

W świetle wymagań gospodarki o obiegu zamkniętym i rosnącej presji na ograniczanie zużycia wody oraz emisji zanieczyszczeń, LCO<sub>2</sub> może być klasyfikowana jako technologia o korzystnym profilu środowiskowym [3–4].

## Podsumowujące porównanie metod czyszczenia odzieży ochronnej

W celu uproszczonego porównania kluczowych parametrów obu technologii przygotowano zbiorcze zestawienie ich efektywności (zob. tabela 8).

Dane pochodzące z publikacji Centexbel [3], UL Solutions [4], Girase i in. [5] oraz NC State [6] potwierdzają, że technologia czyszczenia w ciekłym ditlenku węgla (LCO<sub>2</sub>) zapewnia znacznie wyższą skuteczność dekontaminacji chemicznej niż tradycyjne pranie wodne.

## Znaczenie wyników

Skuteczne usuwanie zanieczyszczeń chemicznych i biologicznych z odzieży ochronnej strażaków ma kluczowe znaczenie dla ograniczania wtórnej ekspozycji na substancje toksyczne, uznane za czynniki nowotworowe lub szkodliwe dla zdrowia. Zebrane dane jednoznacznie pokazują, że odzież po działaniach ratowniczo-gaśniczych może stanowić trwały „magazyn” WWA, SVOC, metali ciężkich i biofilmu [3–5], [10]. Niewystarczająca dekontaminacja zwiększa ryzyko przenikania tych związków przez skórę oraz ich przenoszenia do środowiska osobistego strażaka (pojazdy prywatne, dom, rodzina).

Wyniki przeglądu ukazują wyraźne różnice w efektywności technologii czyszczenia. Metody wodne, choć powszechnie stosowane i dobrze znane, nie zapewniają pełnej dekontaminacji chemicznej i przyspieszają degradację materiałów [3–4], [6]. Technologie alternatywne (ozonowanie, ultradźwięki) mogą być traktowane jako uzupełniające, lecz nie zastępują potrzeby głębokiej ekstrakcji [6], [10].

Technologia LCO<sub>2</sub> wyróżnia się na tle innych metod połączeniem trzech kluczowych czynników:

- high efficiency in removing chemical and biological contaminants,
- preservation of the functional properties of clothing,
- possibility of validation, standardization, and control of the process.

The interpretation of the results also suggests that the first cleaning after exposure is particularly important – improper washing with water can lead to partial fixation of toxins through their secondary penetration into the fibre structure (“first wash effect”), which makes their subsequent removal more difficult and may affect the long-term exposure profile.

Therefore, the collected data can serve as a basis for creating national standard operating procedures (SOPs) in Poland for the maintenance and decontamination of PPE and a certification system for cleaning processes in units of the State Fire Service, Volunteer Fire Service, and rescue units operating in industrial plants.

## Conclusions

1. Firefighters' protective clothing after operational activities is a significant source of secondary exposure to chemical contaminants (PWCs, SVOCs, heavy metals) and biological agents (biofilm). Effective decontamination of PPE is a key element of health prevention and occupational safety for firefighters.
2. The available cleaning technologies vary significantly in terms of effectiveness and impact on materials. Traditional water washing mainly removes surface contaminants, has limited effectiveness against hydrophobic fractions, and accelerates the degradation of the fabrics and DWR coatings.
3. Processes carried out in liquid CO<sub>2</sub> (LCO<sub>2</sub>) show the highest chemical and biological decontamination efficiency among the analysed methods. The literature indicates a reduction in PAHs and SVOCs of ≥90%, a reduction in heavy metal content below the level of detection, and a ≥5-log (≥99.999%) reduction in biofilm, while maintaining the permanent hydrophobicity and mechanical parameters of the materials [3–6], [10]. LCO<sub>2</sub> technology meets the requirements of ISO 23616, NFPA 1851, and PN-EN 469 standards for effective cleaning, maintenance of performance parameters, and process repeatability. These standards require that the decontamination process be safe for the user, validatable, and not cause degradation of the protective properties of PPE. Research results indicate that cleaning with LCO<sub>2</sub> meets these criteria, ensuring high efficiency in removing chemical and biological contaminants while maintaining the integrity of materials [3–5], [7–8], [11]. This is an important reason for using this technology as a standard method of decontaminating PPE for the needs of the State Fire Service, the National Fire Service, and rescue units operating in industrial plants.
4. In accordance with the requirements of ISO 23616:2024, firefighters' personal protective equipment (PPE)

- wysokiej skuteczności usuwania zanieczyszczeń chemicznych i biologicznych,
- zachowania właściwości użytkowych odzieży,
- możliwości walidacji, standaryzacji i kontroli procesu.

Interpretacja wyników sugeruje również, że szczególne znaczenie ma pierwsze czyszczenie po ekspozycji – niewłaściwe pranie wodne może prowadzić do częściowego utrwalenia toksyn poprzez ich wtórne wnikięcie w strukturę włókien („efekt pierwszego prania”), co utrudnia ich późniejsze usunięcie i może wpływać na długoterminowy profil narażenia.

Zebrane dane mogą zatem stanowić podstawę do tworzenia w Polsce krajowych standardowych procedur operacyjnych (SOP) dla utrzymania i dekontaminacji ŚOI oraz systemu certyfikacji procesów czyszczenia w jednostkach PSP, OSP i strażach zakładowych.

## Wnioski

1. Odzież ochronna strażaków po działaniach operacyjnych stanowi istotne źródło wtórnej ekspozycji na zanieczyszczenia chemiczne (WWA, SVOC, metale ciężkie) oraz czynniki biologiczne (biofilm). Skuteczna dekontaminacja ŚOI jest kluczowym elementem profilaktyki zdrowotnej i bezpieczeństwa pracy strażaków.
2. Dostępne technologie czyszczenia różnią się znacząco pod względem efektywności i wpływu na materiały. Tradycyjne pranie wodne usuwa głównie zanieczyszczenia powierzchniowe, charakteryzuje się ograniczoną skutecznością wobec frakcji hydrofobowych oraz przyspiesza degradację tkanin i powłok DWR.
3. Procesy prowadzone w ciekłym CO<sub>2</sub> (LCO<sub>2</sub>) wykazują najwyższą spośród analizowanych metod skuteczność dekontaminacji chemicznej i biologicznej. Literatura wskazuje na redukcję WWA i SVOC na poziomie ≥90%, obniżenie zawartości metali ciężkich poniżej poziomu oznaczalności oraz ≥5-log (≥99,999%) redukcją biofilmu, przy jednoczesnym zachowaniu trwałej hydrofobowości i parametrów mechanicznych materiałów [3–6], [10]. Technologia LCO<sub>2</sub> spełnia wymagania norm ISO 23616, NFPA 1851 i PN-EN 469 w zakresie skutecznego czyszczenia, zachowania parametrów użytkowych oraz powtarzalności procesu. Normy te wymagają, aby proces dekontaminacji był bezpieczny dla użytkownika, walidowalny i nie powodował degradacji właściwości ochronnych ŚOI. Wyniki badań wskazują, że czyszczenie w LCO<sub>2</sub> spełnia te kryteria, zapewniając wysoką skuteczność usuwania zanieczyszczeń chemicznych i biologicznych przy jednoczesnym zachowaniu integralności materiałów [3–5], [7–8], [11]. Stanowi to istotną przesłankę do stosowania tej technologii jako standardowej metody dekontaminacji ŚOI na potrzeby PSP, OSP oraz zakładowych formacji ratowniczych.
4. Zgodnie z wymaganiami normy ISO 23616:2024 środki ochrony indywidualnej strażaków – w szczególności

– specifically special garments, gloves, protective hoods, helmets, and footwear – should be subjected to a decontamination process at least once a year, as well as after every intervention resulting in visible contamination, and prior to the execution of inspection and repair activities. Regular decontamination is an element of the user safety system and constitutes a condition for maintaining the protective properties of PPE specified in ISO 23616, PN-EN 469, and NFPA 1851.

5. The results of the review indicate the need to develop and implement uniform Standard Operating Procedures (SOP) in Poland for the cleaning and decontamination of firefighters' protective clothing, as well as a system for the certification and quality control of service providers (e.g. by the Scientific and Research Centre for Fire Protection – National Research Institute, CNBOP-PIB or the Central Institute for Labor Protection – National Research Institute, CIOP-PIB), ensuring the repeatability and safety of the process.
6. Further research should focus on:
  - the validation of the effectiveness of the LCO<sub>2</sub> process with regard to various types of real operating pollutants (smoke, soot, fuel and synthetic residues, biological pollutants),
  - the analysis of the long-term impact of repeated cleaning cycles on the protective and functional properties of PPE
  - comparative LCA analyses, taking into account resource consumption and environmental impact for different cleaning technologies.

ubrania specjalne, rękawice, kominiarki, hełmy oraz obuwie – powinny być poddawane procesowi dekontaminacji nie rzadziej niż raz w roku, a także po każdej interwencji skutkującej widocznym zanieczyszczeniem oraz przed wykonaniem czynności kontrolnych i naprawczych. Regularna dekontaminacja jest elementem systemu bezpieczeństwa użytkownika i stanowi warunek utrzymania właściwości ochronnych ŚOI określonych w ISO 23616, PN-EN 469 i NFPA 1851.

5. Wyniki przeglądu wskazują na potrzebę opracowania i wdrożenia w Polsce jednolitych Standardowych Procedur Operacyjnych (SOP) dotyczących czyszczenia i dekontaminacji odzieży ochronnej strażaków, a także systemu certyfikacji i nadzoru jakości usługodawców (np. przez Centrum Naukowo-Badawcze Ochrony Przeciwpowozarowej – Państwowy Instytut Badawczy, CNBOP-PIB czy Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, CIOP-PIB), zapewniającego powtarzalność i bezpieczeństwo procesu.
6. Dalsze badania powinny koncentrować się na:
  - walidacji skuteczności procesu LCO<sub>2</sub> w odniesieniu do różnych typów realnych zanieczyszczeń operacyjnych (dym, sadza, pozostałości paliw i materiałów syntetycznych, zanieczyszczenia biologiczne),
  - analizie długoterminowego wpływu powtarzanych cykli czyszczenia na właściwości ochronne i użytkowe ŚOI,
  - porównawczych analizach LCA, uwzględniających zużycie zasobów i obciążenie środowiska dla różnych technologii czyszczenia.

## List of abbreviations

PAHs	– polycyclic aromatic hydrocarbons
SVOC	– semi-volatile organic compounds
LCO <sub>2</sub>	– liquid carbon dioxide
LCA	– Life Cycle Assessment
DWR	– durable water repellency
SOP	– standard operating procedure
PSP	– State Fire Service (Poland)
OSP	– Volunteer Fire Service
ISO	– International Organization for Standardization
NFPA	– National Fire Protection Association
ICP–MS	– inductively coupled plasma mass spectrometry
GC–MS	– gas chromatography–mass spectrometry
LOQ	– limit of quantification
PBDE	– polybrominated diphenyl ethers
PFAS	– per- and polyfluoroalkyl substances
PPE	– personal protective equipment
REACH	– Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals
OEKO-TEX®	– International Association for Research and Testing in Textile Ecology
IQ	– installation qualification

## Wykaz skrótów

WWA	– wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne
SVOC	– związki półlotne organiczne
LCO <sub>2</sub>	– ciekły ditlenek węgla
LCA	– ocena cyklu życia
DWR	– trwała hydrofobowość powierzchniowa
SOP	– standardowa procedura operacyjna
PSP	– Państwowa Straż Pożarna
OSP	– Ochotnicza Straż Pożarna
ISO	– Międzynarodowa Organizacja Normalizacyjna
NFPA	– Krajowe Stowarzyszenie Ochrony Przeciwpowozarowej (USA)
ICP–MS	– spektrometria mas z plazmą sprzężoną indukcyjnie
GC–MS	– chromatografia gazowa ze spektrometrią mas
LOQ	– granica oznaczalności
PBDE	– polibromowane etery difenylove
ŚOI	– środki ochrony indywidualnej
PFAS	– substancje per- i polifluoroalkilowe
REACH	– rozporządzenie WE 1907/2006 dot. chemikaliów
OEKO-TEX®	– standard badań bezpieczeństwa tekstyliów
IQ	– kwalifikacja instalacyjna
OQ	– kwalifikacja operacyjna

OQ	– operational qualification	PQ	– kwalifikacja procesowa / wydajnościowa
PQ	– performance qualification	PTFE	– politetrafluoroetylen
PTFE	– polytetrafluoroethylene	ePTFE	– ekspandowany politetrafluoroetylen
ePTFE	– expanded polytetrafluoroethylene	SEM	– skaningowa mikroskopia elektronowa
SEM	– scanning electron microscopy		

## Literature / Literatura

- [1] IARC, *Occupational Exposure as a Firefighter. IARC Monographs on the Identification of Carcinogenic Hazards to Humans*, Vol. 132, World Health Organization, Lyon, 2022.
- [2] NFPA Research Foundation, *Firefighter Exposure and Cancer Risk: A Review of PPE Contamination Studies*, Quincy, MA 2022.
- [3] Centexbel, *Comparative Evaluation of Liquid CO<sub>2</sub> Cleaning for Firefighter PPE*, Technical Report, Ghent, Belgium 2021.
- [4] UL Solutions, *Assessment of Firefighter Gear Cleaning Methods: Comparative Study on LCO<sub>2</sub> and Water-Based Processes*, Research Report, USA, 2022.
- [5] Girase A., Thompson D., Ormond R.B., *Comparative Analysis of the Liquid CO<sub>2</sub> Washing with Conventional Wash on Firefighters' Personal Protective Equipment (PPE)*, "Textile"s 2022, 2(4), 624–632, <https://doi.org/10.3390/textiles2040036>.
- [6] North Carolina State University, Wilson College of Textiles. *Evaluation of Durability and Contaminant Removal in Firefighter Turnout Gear*, Research Summary, 2021.
- [7] ISO 23616:2024. – Cleaning, inspection and repair of firefighters' personal protective equipment (PPE).
- [8] NFPA 1851:2020. Standard on Selection, Care, and Maintenance of Protective Ensembles for Structural Fire Fighting and Proximity Fire Fighting.
- [9] Schuppe F. *Untersuchung und Bewertung der Kontamination von PSA der Feuerwehren bei der Brandbekämpfung in Innenräumen*, w: *Forschungsbericht, Nr. 199, Ständige Konferenz der Innenminister und -senatoren der Länder*, Arbeitskreis V. – Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung, Institut für Brand- und Katastrophenschutz, Heyrothsberge, 2021.
- [10] Ghent University (UGent), *Microbial Contamination and Biofilm Formation in Firefighter Protective Clothing: Evaluation of Decontamination Techniques*, Laboratory Report, 2022.
- [11] PN-EN 469:2021 – Odzież ochronna dla strażaków – Wymagania użytkowe dotyczące odzieży ochronnej przeznaczonej do akcji przeciwpożarowych.
- [12] European Chemicals Agency (ECHA), REACH Regulation (EC) No. 1907/2006 – Annex XVII, Official Journal of the European Union, 2024.
- [13] OEKO-TEX® Association. Standard 100 Criteria and Limit Values for Textile Products, Zurich, 2023.

**BRYG. W ST. SP. TOMASZ KRASOWSKI, M.SC. ENG.** – a graduate of the Main School of Fire Service, Director of Technology and Development at Decontex Polska, and retired State Fire Service officer. He served for over 30 years, holding positions including commander of JRG 2 in Siedlce, commander of the "Siedlce" Specialized Chemical Rescue Group, and deputy commander of the Municipal Fire Service in Siedlce. He was a member of the teams of the Chief Commander of the State Fire Service responsible for developing strategies, regulations, and executive acts related to fire safety and emergency rescue. Author of numerous industry publications and speaker at numerous rescue seminars and workshops. Creator of the blog "Strażak XXI wieku" (Firefighter of the 21st Century) and initiator of nationwide training projects in the area of tactics and safety in rescue operations.

**BRYG. W ST. SP. MGR INŻ. TOMASZ KRASOWSKI** – absolwent Szkoły Głównej Służby Pożarniczej, Dyrektor ds. Technologii i Rozwoju w Decontex Polska oraz funkcjonariusz PSP w stanie spoczynku. Służbę pełnił przez ponad 30 lat, zajmując m.in. stanowiska dowódcy JRG 2 w Siedlcach, Dowódcy Specjalistycznej Grupy Ratownictwa Chemicznego „Siedlce” oraz Zastępcy Komendanta Miejskiego PSP w Siedlcach. Był członkiem zespołów Komendanta Głównego PSP odpowiedzialnych za opracowanie strategii, regulaminów oraz aktów wykonawczych związanych z bezpieczeństwem pożarowym i ratownictwem interwencyjnym. Autor wielu publikacji branżowych oraz prelegent licznych seminariów i warsztatów ratowniczych. Twórca bloga „Strażak XXI wieku” oraz inicjator ogólnopolskich projektów szkoleniowych z zakresu taktyki i bezpieczeństwa działań ratowniczych.